



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil

Ano 2015

**Catarina Rebelo
Silvério**

**CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS DE PAVIMENTOS
BETUMINOSOS - CONSEQUÊNCIAS NA INTERAÇÃO
VEÍCULO-PAVIMENTO**



**Catarina Rebelo
Silvério**

**CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS DE PAVIMENTOS
BETUMINOSOS - CONSEQUÊNCIAS NA INTERAÇÃO
VEÍCULO-PAVIMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Aos meus pais e irmã.

o júri

presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Silvino Dias Capitão

professor coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Desde já agradeço a todas as pessoas que me acompanharam e incentivaram ao longo do meu percurso académico, especialmente a quem me apoiou durante a realização da presente dissertação, particularmente:

Ao Professor Agostinho Benta, por todos os esclarecimentos, motivação e colaboração ao longo deste trabalho e pelo voto de confiança que depositou em mim.

Ao Engenheiro Ugo Berardinelli, Director de Operações e Manutenção da concessionária ASCENDI – Auto-estradas do Norte, S.A. por toda a disponibilidade e prontidão na cedência de dados necessários para atual dissertação.

À Regina e ao Fábio por toda a ajuda e conselhos dados e pela companhia durante a concretização desta tese. Ao Telmo e à Sofia pela preciosa ajuda e apoio.

Aos meus pais, Leonel Silvério e Anabela Rebelo, pela confiança, sacrifício, apoio, pela motivação e por me ensinarem a não desistir.

À minha irmã, Daniela Silvério, pela amizade e por todas as palavras de incentivo nos momentos mais difíceis, estando sempre presente apesar da distância.

À minha família, em especial aos meus avós pelo carinho.

À Professora Inês Madaleno pelo apoio durante o meu percurso académico e ajuda na realização deste trabalho.

A todos os meus amigos pelas palavras de apoio e pelo companheirismo ao longo destes inesquecíveis cinco anos.

Palavras - chaves

pavimentos rodoviários, segurança rodoviária, atrito, textura; sistemas ativos de segurança, ABS, distância de travagem, grip test, mancha de areia

Resumo

Na presente dissertação é apresentado um modelo de interação pneu-pavimento que poderá vir a ser implementado nos sistemas de segurança ativa, que tem em consideração as características de aderência das camadas de desgaste dos pavimentos rodoviários onde o veículo circula.

A interação entre os pavimentos rodoviários, através das características da sua superfície, e os pneus dos veículos, condiciona a segurança e o conforto dos utilizadores, assim como a durabilidade da estrutura do pavimento.

Esta interação é traduzida pela aderência do pavimento que possibilita a mobilização de forças de atrito entre as duas superfícies, resultante dos efeitos de aceleração, travagem e mudanças de direção durante a condução.

O nível de aderência está relacionado com a microtextura que depende da rugosidade da superfície, com a macrotextura que depende, em grande medida da dimensão dos agregados e com o tipo de superfície dos pneus, este último com um elevado contributo.

Os utilizadores são cada vez mais exigentes, surgindo portanto a necessidade de combinar a evolução de materiais e de equipamentos de ensaio, com novas abordagens a formulações utilizadas nos sistemas de segurança ativa.

Estes sistemas, presentes em muitos veículos que circulam nas estradas, têm como principal objetivo atuar antes que ocorra um acidente. O sistema ABS, exemplo de um sistema de segurança ativa, tem como base de funcionamento o princípio de que o atrito estático, resultante da aderência da roda ao piso, possua valores superiores ao atrito cinético que surge entre duas superfícies em movimento (deslizamento).

Baseado no estudo bibliográfico e em dados experimentais, foi desenvolvido um modelo composto por formulações resultantes da análise teórica.

Essas formulações tiveram como base relações intrínsecas de parâmetros de caracterização superficial, nomeadamente a microtextura, a macrotextura e o parâmetro mais relevante no fenómeno de interação - a presença de água.

Por último, foi feita uma análise comparativa entre as distâncias de travagem resultantes da aplicação do modelo desenvolvido, do modelo de Burckhardt e os valores exigidos pela norma de traçado em vigor.

keywords

road pavements; traffic safety; friction; texture; active safety systems; ABS; braking distance, grip test, mean texture depth

abstract

In this dissertation is presented a tire-pavement interaction model which can be applied in the active safety systems in order to take into account the skid resistance of the road pavements' surface layers where the vehicle circulates.

The interaction between the road surface, through the characteristics of its surface and the vehicles tires, is very important for road user's safety and comfort, as well as the durability of the pavement structure.

This interaction is expressed by the pavement's friction values which allows the mobilization of friction forces between the two surfaces resulting from acceleration effects, braking and direction changes when driving.

The friction level is related to the microtexture which depends on the surface's roughness, to the macrotexture this one depending mostly on the aggregate grain size and to the tires' surface type, the latter with a high contribution.

The road's users are increasingly more rigorous, increasing the need to combine the development of materials and test equipment with new approaches to formulations used in the active safety systems.

These systems, present in many vehicles circulating on roads, have the main purpose to act before an accident occurs. The ABS system, an example of an active safety system, is based on the principle that the static friction, resulting from the wheel's friction to the pavement, possesses higher values than the kinetic friction which results from the friction between two surfaces in motion (slip).

Based on the literature research and real tests available data, an interaction model, resulting from theoretical analysis and practical issues was developed.

Those formulations were based on intrinsic relations of surface characterization parameters, including microtexture, macrotexture and the most relevant parameter on the interaction phenomenon - presence of water.

Finally, a comparative analyses was performed between the braking distances resulting from the developed model, the Burckhardt model and the values demanded by other geometric road standards.

Índices

Índice geral

Índice geral	i
Índice de tabelas	xi
Abreviaturas	xiii
Simbologia.....	xv
1. Introdução	3
1.1. Enquadramento temático	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Estrutura da tese	4
2. Características superficiais dos pavimentos rodoviários	9
2.1. Constituição de um pavimento rodoviário	9
2.2. Características superficiais dos pavimentos rodoviários	12
2.2.1. Textura superficial.....	13
2.2.2. Irregularidade longitudinal e transversal	14
2.2.3. Atrito.....	16
2.2.3.1. Equipamentos para determinação do coeficiente de atrito.....	21
3. Mecanismos de interação veículo-pavimento.....	33
3.1. Aderência pneu-pavimento	33
3.2. Deslizamento longitudinal e dinâmica do veículo	36
3.3. Hidroplanagem	39
3.4. Influência dos pneus	43
3.5. Mecanismos ativos de controlo de travagem e estabilidade	46
3.5.1. Sistemas de segurança ativa	48

3.6. Caracterização física do fenómeno de paragem.....	58
3.6.1. Distância de paragem.....	58
3.6.2. Distância de travagem.....	59
3.6.3. Distância de paragem e coeficiente de atrito.....	60
4. Modelos de interação pneu-pavimento.....	65
4.1. Modelo Penn State.....	65
4.2. Modelo Rado.....	66
4.3. Modelo Burckhardt.....	69
4.4. Fórmula mágica.....	71
5. Desenvolvimento de modelo de interação pneu-pavimento baseado em parâmetros reais do pavimento	77
5.1. Metodologia para obtenção dos parâmetros de Burckhardt através de características no pavimento	77
5.2. Ajuste da metodologia de obtenção dos parâmetros de Burckhardt através de características no pavimento de secções reais	81
6. Análise e discussão de resultados	97
6.1. Modelo de Burckhardt	97
6.1.1. Veículo sem ABS	99
6.1.2. Veículo com ABS	102
6.1.3. Veículo com ABS modificado	105
6.2. Modelo de interação pneu-pavimento desenvolvido.....	106
6.2.1. Betão betuminoso denso	107
6.2.2. Betão betuminoso drenante.....	110
6.3. Norma de traçado	117
7. Considerações finais.....	127
7.1. Conclusões	127
7.2. Perspetivas futuras.....	130

Referências bibliográficas	133
Anexo A – Análise estatística dos dados da bibliografia	A-1
Anexo B – Distâncias de travagem.....	B-1

Índice de figuras

Capítulo 2

Figura 2.1. Microtextura e macrotextura (Salpico, 2009)	13
Figura 2.2. Relação entre a textura e as características da superfície do pavimento (baseado em Bitelli <i>et al.</i> , 2012; PIARC/AIPCR, 2000)	15
Figura 2.3. Variação da textura com o coeficiente de atrito para diversos tipos de misturas betuminosas (adaptado de Corey- Lay, 1998)	16
Figura 2.4. Coeficiente de atrito longitudinal (adaptado de OCDE, 1984).....	17
Figura 2.5. Valores de CAL em função da velocidade em três revestimentos diferentes (Brosseaud, 2005)	18
Figura 2.6. Coeficiente de atrito transversal (adaptado de OCDE, 1984).....	19
Figura 2.7. Determinação do IFI (adaptado de AIPCR/PIARC, 2003)	20
Figura 2.8. Pêndulo Britânico	23
Figura 2.9. Equipamento “GripTester”	24
Figura 2.10. <i>Surface Friction Tester</i>	26
Figura 2.11. <i>BV – 11 Skiddometer</i>	27
Figura 2.12. Vista geral do equipamento SCRIM	28
Figura 2.13. Organização do SCRIM (Couchinho, 2011)	28

Capítulo 3

Figura 3.1. Mecanismos de adesão, histerese e desgaste (Silva, 2008)	34
Figura 3.2. Estrutura de deformação de pneu, raios respetivos e forças na interação com o pavimento (baseado em Almeida, 2013; Linhares, 2015).....	37
Figura 3.3. Curvas μ -s para diferentes cargas verticais e condições do pavimento (Hamersma & Els, 2014; Toresan, 2007).....	39
Figura 3.4. Representação gráfica da hidroplanagem (Silva, 2008).....	40

Figura 3.5. Comportamento do atrito em função da velocidade em pavimento molhado (adaptado de Comfort, 2001).....	40
Figura 3.6. Zonas de interação pneu/pavimento com piso molhado (adaptado de Achútegui, 2002)	42
Figura 3.7. Constituição de um pneu (a) e do respetivo piso (b). (Freitas <i>et al.</i> , 2007)	43
Figura 3.8. Comparação do desempenho de dois pneus com volumes de ranhuras diferentes em duas superfícies de rodagem (adaptado de Veith, 1983).....	45
Figura 3.9. Coeficiente de atrito molhado em curva em função da dureza da borracha do pneu (Veith,1983)	46
Figura 3.10. Relação de segurança rodoviária inteligente (adaptado de Miller, 2014)	46
Figura 3.11. Cronologia do desenvolvimento de sistemas de assistência ao condutor: três gerações (adaptado de Isermann <i>et al.</i> , 2012)	47
Figura 3.12. Processo do ciclo do ABS (Hamersma & Els, 2014; Kawaguchi, 2005).	48
Figura 3.13. Distribuição dos componentes de um sistema ABS num automóvel (Aly <i>et al.</i> , 2011)	49
Figura 3.14. Representação de blocos do ABS (Aly <i>et al.</i> , 2011).....	50
Figura 3.15. Relação entre o coeficiente de atrito e deslizamento da roda no funcionamento do ABS (adaptado de Aly <i>et al.</i> , 2011).....	51
Figura 3.16. Curva de superfície de estrada tipo (Wang <i>et al.</i> , 2014)	54
Figura 3.17. Esquema do teste de avaliação do ESC.	57
Figura 3.18. Representação dos fenómenos de sobreviragem e subviragem	58

Capítulo 4

Figura 4.1. Modelo Penn State de duas superfícies com texturas diferentes (adaptado de Henry, 2000).....	66
Figura 4.2. Relação da velocidade de deslizamento e o coeficiente de atrito da superfície da estrada (adaptado de Henry, 2000)	67

Figura 4.3. Modelo de atrito de Rado ($\mu_{pico}=0,6$ e $S_{m\acute{a}x}=30\text{km/h}$) (adaptado de Al-Qadi <i>et al.</i> , 2002)	68
--	----

Figura 4.4. Curvas μ -s do modelo de Burckhardt.....	70
--	----

Figura 4.5. Modelo de Burckhardt e de Pacejka: Variação da força de travagem vs. deslizamento longitudinal (Dousti <i>et al.</i> , 2015)	72
--	----

Capítulo 5

Figura 5.1. Verificação gráfica da substituição do parâmetro C_1 do modelo de Burckhardt pelo valor de GN (valores médios, máximos e mínimos dos estudos em análise)	79
--	----

Figura 5.2. Variação do parâmetro C_1 baseado em GN no pavimento molhado e seco	80
---	----

Figura 5.3. Verificação gráfica de substituição do parâmetro C_3 do modelo de Burckhardt pelo valor de MTD (valores médios, máximos e mínimos dos estudos em análise)	81
---	----

Figura 5.4. Curvas μ -s para pavimentos secos - primeira proposta.....	83
--	----

Figura 5.5. Curvas μ -s para pavimentos molhados - primeira proposta	84
--	----

Figura 5.6. Curvas μ -s para BB molhados (via A) - primeira proposta e alteração de C_3 ...	85
---	----

Figura 5.7. Curvas μ -s para BB molhados (via A, B, C e D) - primeira proposta e alteração de C_3	85
---	----

Figura 5.8. Curvas μ -s para BB seco (via A, B, C e D) - segunda proposta.....	87
--	----

Figura 5.9. Curvas μ -s para BB molhado (via A, B, C e D) - segunda proposta	88
--	----

Figura 5.10. Curvas μ -s para BB seco (via A, B, C e D) - terceira proposta.....	89
--	----

Figura 5.11. Curvas μ -s para BB molhado (via A, B, C e D) - terceira proposta	90
--	----

Figura 5.12. Curvas μ -s do modelo desenvolvido para as vias de BB	91
--	----

Figura 5.13. Curvas μ -s do modelo desenvolvido para as vias de BB	93
--	----

Capítulo 6

Figura 6.1. Efeito de variação de s_t na distância de travagem em pavimento de Betão e de BB seco para veículos com ABS e sem ABS.....	98
--	----

Figura 6.2. Regiões que subdividem a distância de travagem num veículo sem ABS.	100
--	-----

Figura 6.3. Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para os pavimentos que constam no modelo de Burckhardt	102
Figura 6.4. Regiões que subdividem a distância de travagem num veículo com ABS	103
Figura 6.5. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para os pavimentos que constam no modelo de Burckhardt	104
Figura 6.6. Regiões que subdividem a distância de travagem num veículo com ABS modificado	105
Figura 6.7. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para os pavimentos que constam no modelo de Burckhardt	106
Figura 6.8. Curvas μ -s do modelo proposto para BB e do modelo de Burckhardt	107
Figura 6.9. Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS no pavimento em BB	108
Figura 6.10. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS no pavimento em BB	109
Figura 6.11. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado no pavimento em BB	109
Figura 6.12. Curvas μ -s do modelo proposto para BBD e do modelo de Burckhardt	111
Figura 6.13. Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS no pavimento em BBD	112
Figura 6.14. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS no pavimento em BBD	113
Figura 6.15. Redução da distância de travagem entre o veículo sem ABS e com ABS no pavimento velho molhado	114
Figura 6.16. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado no pavimento em BBD	115
Figura 6.17. Redução da distância de travagem entre o veículo sem ABS e com ABS modificado no pavimento velho molhado	116

Figura 6.18. Distância de travagem em função da velocidade do veículo segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para pavimento em BB.....	117
Figura 6.19. Distâncias de travagem em BB para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 50 km/h e condições do pavimento (seco e molhado).....	118
Figura 6.20. Distâncias de travagem em BB para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 90 km/h e condições do pavimento (seco e molhado).....	118
Figura 6.21. Distâncias de travagem em BB para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 120 km/h e condições do pavimento (seco e molhado).....	119
Figura 6.22. Distâncias de travagem em BB para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 140 km/h e condições do pavimento (seco e molhado).....	119
Figura 6.23. Distância de travagem em função da velocidade do veículo segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para pavimento em BBD.....	120
Figura 6.24. Distâncias de travagem em BBD para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 50 km/h e condições do pavimento (novo seco e velho molhado)	121
Figura 6.25. Distâncias de travagem em BBD para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 90 km/h e condições do pavimento (novo seco e velho molhado)	121
Figura 6.26. Distâncias de travagem em BBD para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 120 km/h e condições do pavimento (novo seco e velho molhado)	122
Figura 6.27. Distâncias de travagem em BBD para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 140 km/h e condições do pavimento (novo seco e velho molhado)	122

Figura 6.28. Curvas μ -s do modelo de interação pneu-pavimento proposto, do modelo de Burckhardt e da fórmula mágica.....	123
---	-----

Índice de tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1. Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco <i>et al.</i> , 2011)	9
Tabela 2.2. Influência das principais características superficiais dos pavimentos nas exigências dos mesmos (OCDE, 1984, <i>cit. in</i> Ascenso 2011)	12
Tabela 2.3. Classificação da textura superficial de acordo com a PIARC (Bernucci <i>et al.</i> , 2007)	13
Tabela 2.4. Condições normais de ensaio com o GripTester (Do & Roe, 2008)	25
Tabela 2.5. Condições normais de ensaio de <i>Surface Friction Tester</i> (Do & Roe, 2008)...	26
Tabela 2.6. Condições normais de ensaio de SCRIM (Do & Roe, 2008).....	29

Capítulo 3

Tabela 3.1. Valores normativos mínimos de textura e resistência à derrapagem (adaptado de Fernandes & Neves, 2008)	35
Tabela 3.2. Intervalos característicos do tipo de estrada (Wang <i>et al.</i> , 2014).....	54
Tabela 3.3. Valores de atrito de acordo com a AASHTO (1994, 2001) e Guzmán (1995) .	61
Tabela 3.4. Cálculo da distância de travagem para os valores de atrito da Tabela 3.3 (Aps, 2006).	61
Tabela 3.5. Distâncias de visibilidade mínimas paragem e coeficientes de atrito longitudinal (JAE, 1994; INIR, 2010)	62

Capítulo 4

Tabela 4.1. Valores dos parâmetros das estradas tipos para aplicação do modelo de Burckhardt (Wang <i>et al.</i> , 2014)	70
Tabela 4.2. Parâmetros típicos para aplicação do modelo de fórmula mágica (Pinto, 2014)	72

Capítulo 5

Tabela 5.1. Resultados da análise estatística dos dados bibliografia.....80

Tabela 5.2. Valores de *Grip-Test* e Mancha de Areia dos lanços da A25 e A2982

Capítulo 6

Tabela 6.1. Valor de energia cinética e do trabalho da força de atrito para as velocidades
em estudo.....99

Tabela 6.2. Parâmetro k para o cálculo de coeficiente de permeabilidade e altura de água
para betão betuminoso drenante110

Capítulo 7

Tabela 7.1. Variáveis nos diferentes modelos para determinação do coeficiente de atrito128

Abreviaturas

AASHTO	<i>American Association of State Highways and Transportation Officials</i>
ABS	Sistema anti-bloqueio de travagem
ACAS	Sistema anticolisão de bordo
ACC	Controlo de cruzeiro adaptativo
ADAS	Sistema avançados de assistência ao condutor
AFS	Direção frontal ativa
ASR	Sistema de controlo de tração
BAS	Sistema de assistência à travagem
BB	Betão betuminoso denso
BBD	Betão betuminoso drenante
BUTYL	Borracha de butil
BR	Borracha polibutadieno
CAL	Coefficiente de atrito longitudinal
CAT	Coefficiente de atrito transversal
DP	Distância de paragem
EBD	Distribuição da força de travagem
EBS	Sistema de travagem elétrica
ESP	Sistema eletrónico de estabilidade
EP	Estradas de Portugal. S.A.
GN	<i>Grip Number</i>
IFI	Índice Internacional de Atrito
INIR	Instituto Nacional de Infraestruturas Rodoviárias
JAE	Junta Autónoma de Estradas (extinta)
MTD	Profundidade média da textura superficial

NR	Borracha natural
PIARC/AIPCR	<i>Permanent International Association of Road Congress</i> / Associação Internacional Permanente de Congressos Rodoviários, da Associação Mundial de Estradas
PNG	Porcentagem do gradiente normalizado
PTV	Valor de teste de Pêndulo Britânico
RRN	Rede Rodoviária Nacional
SBR	Borracha de butadieno – estireno
SCRIM	<i>Sideway Coefficient Routine Inspection Machine</i>
SRS	Sistema de retenção secundário
UEC	Unidade eletrônica de controlo do sistema ABS

Simbologia

Letras latinas

A, B e C	Constantes de calibração próprias para um determinado equipamento
a e b	Constantes determinadas em função do equipamento utilizado
C	Fator de forma relacionado com a textura
C_1	Coefficiente de Burckhardt (condicionador do valor máximo da curva de atrito no modelo de Burckhardt)
C_2	Coefficiente de Burckhardt (condicionador da forma da curva de atrito no modelo de Burckhardt)
C_3	Coefficiente de Burckhardt (condicionador da diferença entre máximo da curva atrito e o valor de $s=1$)
D	Diâmetro médio do círculo no ensaio de mancha de areia
d_i	Distância percorrida nas regiões em análise
d_1	Distância de percorrida pelo veículo no tempo de percepção – reação
d_2	Distância de percorrida pelo veículo durante o tempo de travagem
E_c	Energia cinética
h_G	Profundidade do piso da banda de rodagem do pneu
h_w	Altura de água
h_w^*	Altura de água efetiva
F_a	Força de atrito
F_x	Força perpendicular ao plano de rotação da roda
F_z	Força paralela ao plano de rotação da roda
G	Inclinação longitudinal da estrada
g	Aceleração da gravidade
k	Coefficiente dependente da permeabilidade da superfície da camada de desgaste
n	Coefficiente dependente da “porosidade” da superfície da camada de desgaste

m	Massa do veículo
P	Peso do veículo
r	Raio da roda
r_{eff}	Raio efetivo da roda
r_i	Variação do coeficiente de atrito ao longo da região em estudo
S	Velocidade de deslizamento nos ensaios
S_p	Constante de velocidade de referência relacionado com a textura
s	Deslizamento longitudinal
s_0	Limite superior de integração (controlo inicial de ABS)
s_p	Deslizamento onde o trabalho da força de atrito anula a energia cinética
s_t	Deslizamento total do veículo na travagem
T_x	Valores d e profundidade de textura
t	Tempo de percepção-reação
V	Velocidade linear
V_h	Velocidade de hidroplanagem
V_w	Velocidade linear do ponto de contacto com o solo
W_{Fa}	Trabalho da força de atrito

Letras gregas

α	Ângulo em relação ao eixo longitudinal do veículo
β	Ângulo de escorregamento dos pneus
γ	Grau de saturação da superfície da superfície da camada de desgaste
ω	Velocidade angular
ϕ_A	Fração da área das ranhuras
ϕ_V	Volume de ranhura fracionária

μ	Coeficiente de atrito
μ_0	Coeficiente de atrito quando a velocidade é nula
μ_{crit}	Coeficiente de atrito de deslizamento crítico
μ_p	Coeficiente de atrito longitudinal em função da velocidade assumido em projeto
μ_{pico}	Coeficiente de atrito máximo na curva característica de cada pavimento
Δ_{St}	Incremento da razão de deslizamento
Δ_S	Diferença da razão de deslizamento longitudinal na região
τ	Valor característico da estrada
λ	Coeficiente dependente da permeabilidade da superfície da camada de desgaste

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1. Introdução

O trabalho desenvolvido incide no estudo sobre a influência das características superficiais dos pavimentos betuminosos na distância de travagem dos veículos através de formulações analíticas.

Este capítulo expõe o enquadramento do tema da dissertação, os objetivos do trabalho e a estrutura do documento.

1.1. Enquadramento temático

Atualmente as deslocações e as viagens fazem parte integrante da condição humana. Apesar de todos os avanços tecnológicos, a circulação em veículos automóveis acarreta ainda riscos significativos e, de modo a minimizá-los, as condições do pavimento em geral e a aderência do pavimento em particular são da maior importância.

Por estarem intimamente relacionadas com a segurança dos utentes da estrada, as características funcionais dos pavimentos são cada vez mais valorizadas, havendo uma maior oferta de novos materiais e tecnologias construtivas, procura-se dar resposta às cada vez mais exigentes necessidades dos utentes da estrada. Contudo, os métodos correntes de dimensionamento de pavimentos são ainda quase exclusivamente centrados na capacidade estrutural dos mesmos. Deste modo, cabe aos projetistas das futuras estradas conceber pavimentos que combinem a durabilidade da estrutura com a otimização do desempenho funcional, particularmente o desempenho das camadas superficiais de desgaste.

Por estes motivos, torna-se imperativo apostar no estudo das características funcionais dos pavimentos, características estas diretamente relacionadas com a segurança e com o conforto dos utilizadores da rede rodoviária nacional.

Os ensaios de caracterização facultam informações sobre os parâmetros intrínsecos ao pavimento e os parâmetros de estado, tais como: coeficientes de atrito pneu-pavimento (transversal e longitudinal); macrotextura e microtextura; porosidade; petrografia do agregado constituinte da mistura betuminosa; estado hídrico do contacto pneu-pavimento e geometria do traçado (geometria do contacto pneu-pavimento).

Por outro lado, têm surgido nos últimos anos grandes desenvolvimentos nos sistemas ativos de travagem, porém, a generalidade dos modelos mecânicos em que se baseiam

usam atualmente curvas genéricas que aproximam às condições existentes não contemplando a diversidade de características e condições dos pavimentos existentes.

A diferença significativa entre o modelo de interação que se pretende estabelecer e os demais já existentes (Wilson, 2006; Azimi, Galal & Pekau, 2011; Hamersma & Els, 2014; Andersen, Larsen, Fraser, Schmidt & Dyre, 2014; Dousti, Baslamisli, Onder & Solmaz, 2015), reside, por um lado, na análise integrada de parâmetros intrínsecos e de estado e, por outro, na consideração da interação com os mecanismos ativos de controlo de travagem ou de estabilidade do veículo, uma vez que a existência destes sistemas modifica a ação do veículo sobre a superfície do pavimento.

Também, os pressupostos de projeto, nomeadamente, no que se refere à avaliação de distâncias de paragem e à limitação de velocidades, estão em muito desfasados desta nova realidade.

1.2. Objetivos

Partindo do estudo teórico das características superficiais dos pavimentos betuminosos rodoviários e da relação destas características com o desempenho dos mesmos, particularmente, no que concerne ao desempenho das camadas superficiais, pretende-se com este trabalho desenvolver um modelo de interação pneu-pavimento, baseado nos implementados nos sistemas de segurança ativa, que tome em consideração as características das camadas superficiais dos pavimentos rodoviários e, deste modo, avaliar as distâncias de travagem em diferentes tipos de camadas de desgaste, em veículos sem ABS, com ABS e com ABS modificado.

Pretende-se obter um modelo de comportamento de diferentes pavimentos baseado nos ensaios de caracterização superficial corrente, de forma a substituir os modelos muito desenvolvidos do ponto de vista da mecânica mas que usam atualmente curvas genéricas que aproximam às condições existentes.

1.3. Estrutura da tese

A presente dissertação está organizada em sete capítulos, incluindo este primeiro de carácter introdutório onde se faz um enquadramento da temática abordada e definem-se os objetivos, seguindo-se do segundo capítulo, onde são apresentados os três tipos de

pavimentos rodoviários, as principais características superficiais dos pavimentos e alguns equipamentos de medição do coeficiente de atrito.

No terceiro capítulo é apresentado o mecanismo de interação pneu-pavimento através de aderência e é introduzido o conceito de deslizamento horizontal e de hidroplanagem. Também são descritos alguns mecanismos de controlo de travagem e estabilidade existentes em alguns veículos e caracterizado fisicamente o fenómeno de paragem.

No quarto capítulo são introduzidos alguns modelos matemáticos de interação pneu-pavimento.

O capítulo cinco incide sobre a componente prática do trabalho, onde inicialmente são apresentadas as formulações teóricas do modelo proposto, onde se pretende explorar o modelo de Burckhardt e adaptar os seus princípios ao desenvolvimento de um modelo baseado nas características superficiais de pavimentos betuminosos.

No capítulo seis é efetuado um estudo aprofundado sobre a distância de travagem em diferentes tipos de pavimentos, que constam na fórmula de Burckhardt, nos três tipos de veículos (sem ABS, com ABS e com ABS modificado). Ainda neste capítulo, considerando a formulação proposta no capítulo anterior, são calculadas as distâncias de travagem nas diferentes velocidades (50, 90, 120 e 140 km/h) e nos diferentes sistemas de travagem e comparadas com as calculadas pelo método de Burckhardt e pela norma de traçado em vigor.

Por último, no sétimo capítulo são enumeradas as considerações finais sobre o trabalho realizado e sugeridas algumas propostas para desenvolvimentos futuros do mesmo.

Capítulo 2

CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS DOS PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS

2. Características superficiais dos pavimentos rodoviários

A principal função de uma rede viária é oferecer aos seus utilizadores uma infraestrutura que permita a circulação de veículos em adequadas condições de segurança, conforto e economia durante o seu período de vida útil, sob as ações de tráfego e diferentes condições climáticas que ocorrem. A segurança depende, não só das características do traçado mas também, e em grande medida, das características do pavimento, entre as quais se destacam a regularidade e a resistência à derrapagem conferida pela textura superficial e pelo atrito.

2.1. Constituição de um pavimento rodoviário

Um pavimento rodoviário é composto por várias camadas de diferentes materiais, coladas entre si através de colas betuminosas (colagem geralmente obtida por aplicação de emulsões betuminosas). Estas camadas estão assentes na fundação do pavimento, constituída pelo terreno natural ou solos selecionados de camada de aterro (Branco, Pereira & Picado-Santos, 2011).

A classificação dos pavimentos tem em conta dois critérios, os tipos de materiais e a resposta mecânica. De acordo com estes critérios são diferenciados em pavimentos flexíveis, rígidos ou semi-rígidos (Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (Branco *et al.*, 2011)

Tipo de pavimento	Material (ligante)	Deformabilidade
Flexível	Betuminosos e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semi-rígido	Betuminosos, hidráulicos e granulares	Reduzida

Os pavimentos flexíveis são caracterizados por possuírem uma ou várias camadas formadas por misturas betuminosas (materiais estabilizados com ligantes betuminosos, geralmente com betume asfáltico). Estes pavimentos quando carregados apresentam uma boa recuperação elástica.

Os pavimentos rígidos têm uma ou duas camadas inferiores constituídas por agregado estabilizado com ou sem ligante hidráulico, e superiormente são compostos por uma camada de betão de cimento, geralmente cimento Portland ¹ (Silva, 2009).

Os pavimentos semi-rígidos apresentam uma ou duas camadas superiores constituídas por misturas betuminosas, seguida de uma camada de base constituída por agregado estabilizado com ligante hidráulico que poderá assentar numa sub-base granular (Branco *et al.*, 2011).

Em função dos objetivos do presente trabalho interessa, sobretudo, estudar os pavimentos flexíveis visto serem os mais frequentes na rede rodoviária portuguesa. Mais concretamente, e atendendo ao escopo desta pesquisa, interessa particularmente estudar as características das camadas superficiais, geralmente designadas de camadas de desgaste.

A camada de desgaste em pavimentos flexíveis é geralmente composta por misturas betuminosas fabricadas a quente ou misturas betuminosas fabricadas a frio. Atualmente, a grande maioria das misturas betuminosas a quente aplicadas em camadas de desgaste é englobada na designação Betão Betuminoso (“*Asphalt Concrete*”). Esta mistura caracteriza-se por ser pouco permeável, resistente à ação abrasiva do tráfego e é aplicada com uma espessura de 4 a 6 cm (Branco *et al.*, 2011).

As misturas betuminosas fabricadas a frio são produzidas, espalhadas e compactadas sem aquecimento dos materiais e são compostas por agregados aos quais se junta uma emulsão betuminosa (ligante), podendo, ainda ser adicionados água e aditivos. Estas misturas são, geralmente, aplicadas em camadas de pavimento onde as solicitações de tráfego não são significativas.

2.1.1. Principais camadas de desgaste

As misturas betuminosas aplicadas na camada de desgaste desempenham funções estruturais e funcionais sendo, estas últimas, importantes na formulação da mistura em causa. Têm-se desenvolvido misturas betuminosas especiais para as camadas de desgaste como é o exemplo das misturas drenantes e das misturas rugosas.

¹ O cimento Portland é um cimento artificial obtido por tratamento térmico a alta temperatura (cerca de 1450°C) de misturas de argila (aluminosilicatos hidratados) e calcário (carbonato de cálcio), devidamente proporcionadas e finamente moídas (Silva, 2009).

O betão betuminoso (BB) é uma mistura pouco permeável, resistente à ação abrasiva do tráfego. A sua macrotextura possui valores baixos pelo que não é adequada a sua aplicação em vias onde a velocidade de circulação é elevada e em climas chuvosos (Jiménez, 2014).

O betão betuminoso drenante (BBD) é uma mistura betuminosa aberta, isto é, com elevada porosidade usada na camada de desgaste, com cerca de 4 cm de espessura e permite que a drenagem da água que atinge o pavimento ocorra através do interior da camada superficial até às bermas e não à superfície como é habitual. Este tipo de mistura permite melhorar os níveis de segurança, as condições de aderência, a comodidade, o ruído produzido pelo deslocamento dos veículos e oferece menor resistência ao rolamento dos pneus (Branco *et al.*, 2011). Com este tipo de pavimentos, a circulação em condições molhadas é comparável com a praticada sobre um pavimento seco, pois o risco de existência de água superficial diminui (Francisco, 2009). Por outro lado, estas misturas apresentam problemas ao nível da colmatção de vazios, menor resistência aos efeitos abrasivos do tráfego e menor durabilidade. De modo a solucionar estes problemas, estas misturas podem ser aplicadas em zonas com elevados níveis de pluviosidade para permitir uma fácil limpeza (Francisco, 2009; Jiménez, 2014).

O micro - betão betuminoso rugoso proporciona uma excelente macrotextura (textura superficial do camada de desgaste), com efeitos benéficos na segurança aquando a circulação com chuva e com pavimento molhado. É aplicado em autoestradas, com elevado tráfego de pesados e possui uma espessura entre os 2,5 e 3,5 cm (Jiménez, 2014). Esta mistura não apresenta problemas de colmatção dos poros pois apesar de ter uma superfície bastante rugosa, a sua estrutura é fechada pelo que a drenagem de água ocorre à superfície e não pelo interior da camada (Duarte, 2011).

O betão betuminoso rugoso com borracha é um betão betuminoso ao qual é adicionado borracha, proveniente da reciclagem de pneus na composição do betume ou na mistura do agregado, o que permite melhorar a sua capacidade estrutural e funcional. Devido à maior flexibilidade do material, este tipo de mistura reduz o fendilhamento por fadiga, apresentando uma maior resistência aos agentes atmosféricos e uma melhor aderência entre o pneu e pavimento (Duarte, 2011).

O betão de cimento é a camada de desgaste dos pavimentos rígidos que apresenta uma elevada resistência por um longo período de vida útil. No entanto, tem custos elevados e a

existências de descontinuidades (juntas ou fendas) carecem de especial atenção de modo a serem tratadas e mitigadas de forma eficiente (Duarte, 2011).

2.2. Características superficiais dos pavimentos rodoviários

Os pavimentos rodoviários devem garantir algumas características funcionais e estruturais essenciais para proporcionarem boas condições de circulação. Segundo Austroads (2003), estas características traduzem-se em:

- Superfície de rolamento adequada;
- Segurança, economia e durabilidade de toda a superfície;
- Minimizar os custos operacionais e de manutenção dos veículos;
- Minimizar a taxa de desgaste do pavimento;
- Reduzir a infiltração de água no pavimento;
- Fornecer propriedades adequadas para o ambiente local (ex. redução de ruído).

A Tabela 2.2 resume a influência das principais características superficiais dos pavimentos na segurança e comodidade dos condutores, bem como no meio ambiente e na economia de circulação e operação.

Tabela 2.2. Influência das principais características superficiais dos pavimentos nas exigências dos mesmos (OCDE, 1984, *cit. in* Ascenso 2011)

Factores de Influência		Exigências			
		Segurança	Comodidade	Ambiente	Economia
Aderência		■	□	□	□
Regularidade	Longitudinal	■	■	□	■
	Transversal	■	■	□	□
Resistência ao rolamento		□	□	□	■
Ruído de contacto pneu/pavimento		□	■	■	□
Características reflectoras		■	■	□	■
Legenda: <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="display: flex; align-items: center;"> Grande influência </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> Influência moderada </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> Influência nula </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> Influência marcante </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> Influência pequena </div> </div>					

Ao analisar a Tabela 2.2 verifica-se que a aderência dos veículos ao pavimento é o fator mais determinante na segurança dos utilizadores das estradas. Esta importância acresce ainda mais na presença de chuva, pois a presença de água na superfície do pavimento diminui a aderência do pavimento.

2.2.1. Textura superficial

A textura da camada de desgaste de um pavimento é classificada através do comprimento de onda (dimensão horizontal) e da amplitude (dimensão vertical) das irregularidades da sua superfície (Bernucci, Mota, Ceratti & Soares, 2007). A Tabela 2.3 apresenta a classificação adotada pela PIARC – *The World Road Association*.

Tabela 2.3. Classificação da textura superficial de acordo com a PIARC (Bernucci *et al.*, 2007)

Classificação da Textura	Microtextura	Macrotextura	Megatextura	Irregularidade
Intervalo de comprimento de onda	0 – 0,5 mm	0,5 mm – 50 mm	50 mm – 500 mm	0,5 m – 50 m

Esta característica é influenciada pela degradação dos componentes materiais do revestimento do pavimento devido ao tráfego e aos agentes erosivos. É, portanto, uma característica de estado, alterável a cada instante e observável, por meios óticos e mecânicos.

A macrotextura depende do tamanho do agregado, da curva granulométrica (quantidades relativas dos diversos tamanhos de agregado), da forma do agregado e dos vazios existentes na mistura enquanto a microtextura é dependente da rugosidade superficial, da natureza petrográfica e química e da resistência ao polimento dos agregados utilizados (Figura 2.1) (Silva, 2009; Merighi, Peres & Silva, 2006).

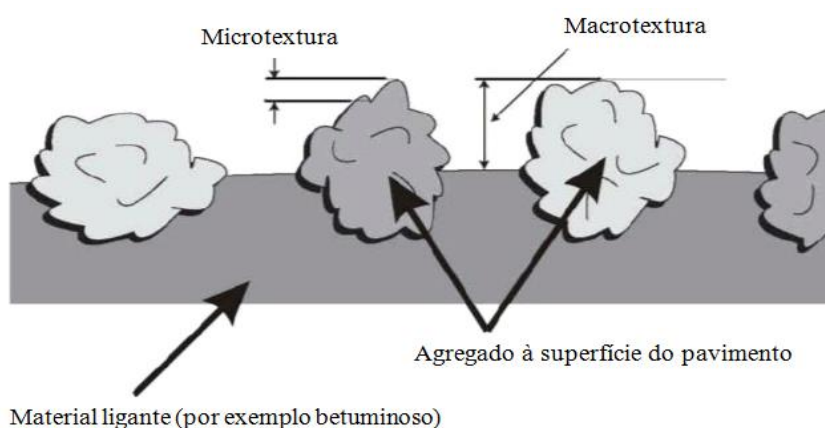


Figura 2.1. Microtextura e macrotextura (Salpico, 2009)

A *Highways Agency* (2001) afirma que a microtextura conferida pela superfície do agregado é a característica que mais contribui para a resistência ao deslizamento e é um

fator determinante na resistência à derrapagem do pavimento molhado a baixas velocidades.

A textura tem, desta forma, influência no que respeita à segurança, ao custo de operação dos veículos, ao conforto e ao ambiente, sendo fundamental adotar métodos fiáveis de avaliação desta característica (Menezes, 2008).

Este parâmetro de estado do pavimento tem consequências em diversas características da interação veículo-pavimento, tais como (Branco *et al.*, 2011):

- Desenvolvimento das forças de atrito no contacto pneu/pavimento em condições desfavoráveis, piso húmido ou molhado;
- Consumo de combustível;
- Desgaste dos pneus por micro-deslizamento da borracha no contacto pneu/pavimento;
- Ruído de baixa frequência, no interior e exterior dos veículos;
- Vibrações transmitidas ao volante e ao interior dos veículos.

Quando a textura se refere a variações geométricas com o comprimento de onda superiores a meio metro, esta passa a ser tratada como uma irregularidade superficial (longitudinal ou transversal).

2.2.2. Irregularidade longitudinal e transversal

A textura e a irregularidade superficial são parâmetros determinantes na correta avaliação do estado da superfície do pavimento (Loprencipe & Cantisani, 2013).

A irregularidade longitudinal pode ser analisada a partir dos desnivelamentos da superfície do pavimento em relação ao seu perfil (Ascenso, 2011) e a partir dos efeitos físicos provocados pela irregularidade (Menezes, 2008). Esta análise é bastante complexa uma vez que compreende a variação altimétrica ao longo do desenvolvimento do perfil longitudinal, deste modo, não se pode apontar uma irregularidade para determinado ponto, mas sim para um determinado comprimento (Delanne, 1997, *cit. in* Menezes 2008).

A regularidade do perfil transversal é uma característica fundamental no desempenho da estrada e, portanto, um importante fator na avaliação global da qualidade do pavimento. O parâmetro que, frequentemente, se usa para avaliar esta característica é a profundidade

máxima das rodeiras (Menezes, 2008). Este parâmetro é obtido a partir da análise do perfil transversal e é um ótimo revelador do estado de degradação do pavimento.

A Figura 2.2 representa, de uma forma esquemática, os efeitos qualitativos da textura e das irregularidades no desempenho dos pavimentos rodoviários tendo em conta os diferentes comprimentos de onda.

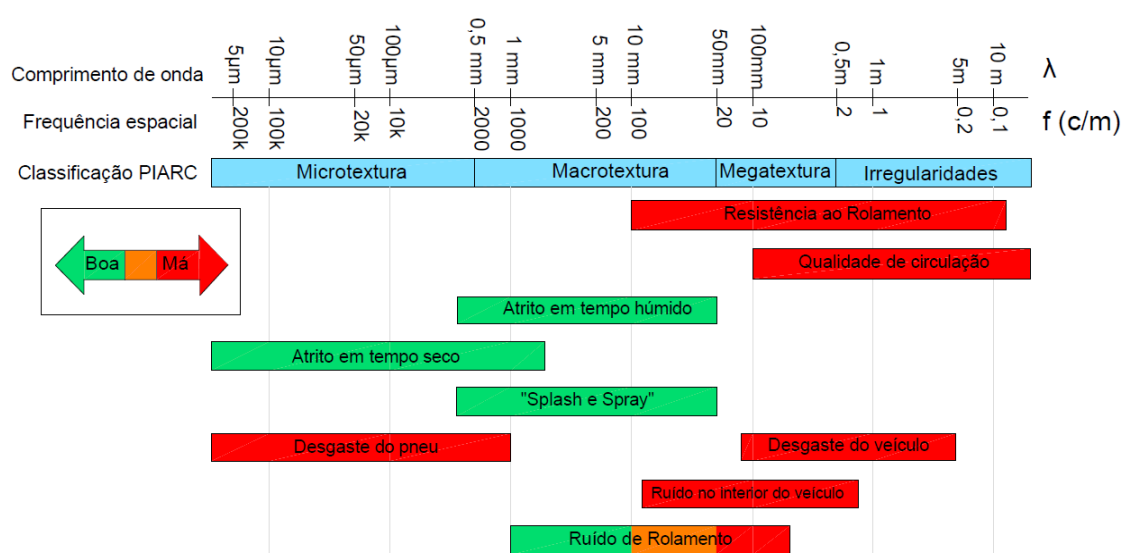


Figura 2.2. Relação entre a textura e as características da superfície do pavimento (baseado em Bitelli *et al.*, 2012; PIARC/AIPCR, 2000)

De acordo com Corey- Lay (1998, *cit. in* Aps 2006) o tipo de mistura betuminosa presente na camada de desgaste influencia o valor de textura (MTD) medido pelo ensaio da mancha de areia e o valor do coeficiente de atrito (PTV) medido por meio do Pêndulo Britânico (ensaio descrito em 2.7.1.).

A Figura 2.3 ilustra a variação da textura com o coeficiente de atrito em 14 troços com diferentes tipos de misturas betuminosas. Observa-se que o tipo de camada de desgaste tem uma importante influência na textura e no coeficiente de atrito pois os valores destes parâmetros de estado alteram-se para cada um dos tipos de misturas representadas.

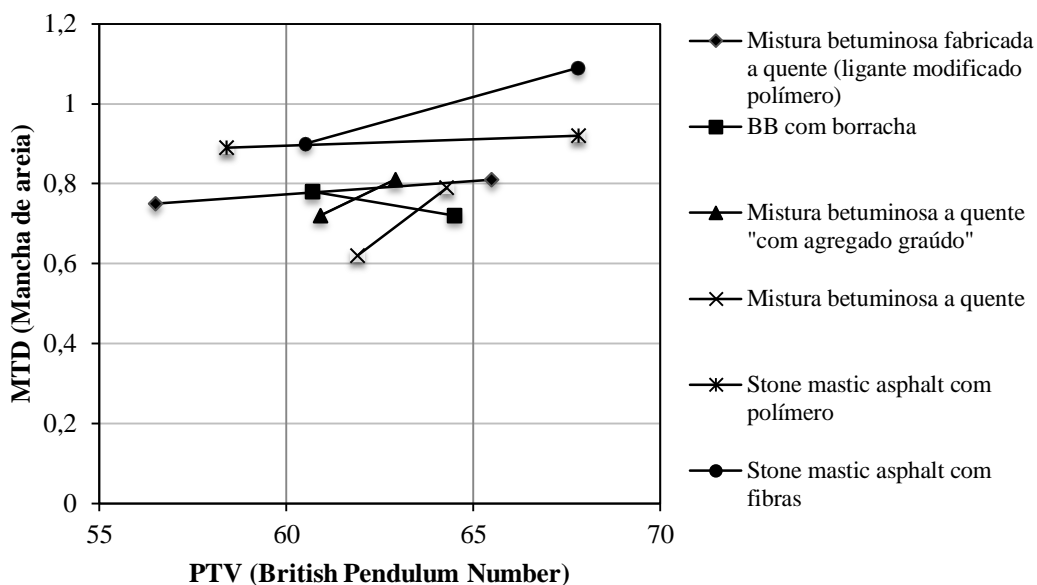


Figura 2.3. Variação da textura com o coeficiente de atrito para diversos tipos de misturas betuminosas (adaptado de Corey- Lay, 1998)

2.2.3. Atrito

O atrito é uma propriedade física da superfície da estrada que é medida utilizando equipamento específico sob condições padronizadas. É, geralmente medido em piso molhado, uma vez que o nível de resistência à derrapagem é menor nesta situação pois a água atua como lubrificante da superfície do pavimento (Menezes, 2008).

Trata-se de um parâmetro que evolui no tempo em função de determinados fatores, Branco *et al.* (2011) destacam principalmente: o desgaste mecânico e o polimento dos agregados; a exsudação na camada de desgaste; o aparecimento de descontinuidades devidas ao fendilhamento; a redução da porosidade do pavimento devido à densificação da camada de desgaste; a existência de rodeiras, provocando a acumulação de água e a poluição devido ao derrame de combustíveis, como os fatores mais condicionantes do atrito da camada de desgaste.

A avaliação do atrito do pavimento pode ser feita através da medição do coeficiente de atrito longitudinal (CAL) e do coeficiente de atrito transversal (CAT). O primeiro avalia sobretudo a distância de travagem, o segundo interessa sobretudo à segurança de circulação em curva (Branco *et al.*, 2011). Estes valores de coeficiente dependem de fatores como (Silva, 2009):

- Tipo de pneus (constituição, desenho, composição e qualidade da borracha), grau de desgaste, pressão de enchimento e carga por roda;
- Presença de água no pavimento e textura superficial do mesmo;
- Existência de materiais provenientes dos veículos (borracha, etc.) acumulados sobre o pavimento e espessura dos mesmos;
- Época do ano (temperatura e pluviosidade);
- Velocidade de circulação.

O coeficiente de atrito longitudinal (CAL) é dado pela razão entre a força, F_x , que se opõe ao deslocamento do rodado, e a reação normal, F_z , à carga exercida pela roda dotada de uma velocidade angular, ω , e velocidade, V (Figura 2.4).

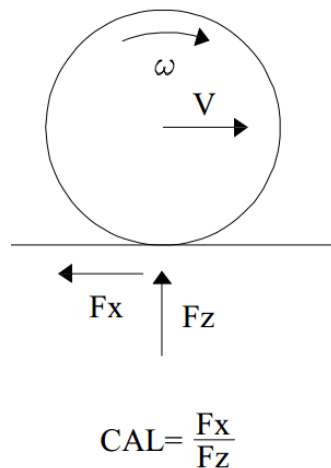


Figura 2.4. Coeficiente de atrito longitudinal (adaptado de OCDE, 1984)

Sendo r o raio da roda, em caso de rolamento livre a velocidade angular será:

$$\omega_L = \frac{V}{r} \quad (2.1)$$

Quando $\omega_L = 0$ a roda está bloqueada.

Por outro lado, quando $0 < \omega_D < \frac{V}{r}$ a roda apresenta-se parcialmente bloqueada com grau de deslize, s , dado pela expressão:

$$s = \frac{\omega_L - \omega_D}{\omega_L} \quad (2.2)$$

Resultando:

$s = 1$ no caso de roda travada ($\omega_D = 0$)

$s = 0$ no caso de rolamento livre ($\omega_D = \omega_L$)

O deslizamento longitudinal (s), que será abordado mais extensivamente no subcapítulo 3.2 é decisivo na distância de paragem e é medido através de ensaios que medem a força desenvolvida na interface pneu-pavimento como por exemplo, reboques tracionados a elevada velocidade com bloqueio de roda do reboque durante alguns instantes (Branco *et al.*, 2011).

Brosseud (2005) estudou a variação do CAL em função da velocidade recorrendo a um equipamento de roda bloqueada em três tipos de revestimentos, nomeadamente um betão betuminoso drenante (BBDr – *Béton Bitumineux Drainants*), um tratamento superficial (ECF – *Enrobés Coulés à Froid*) e um betão betuminoso denso (BBSG – *Béton Bitumineux Semi- Grenus*) (Figura 2.5).

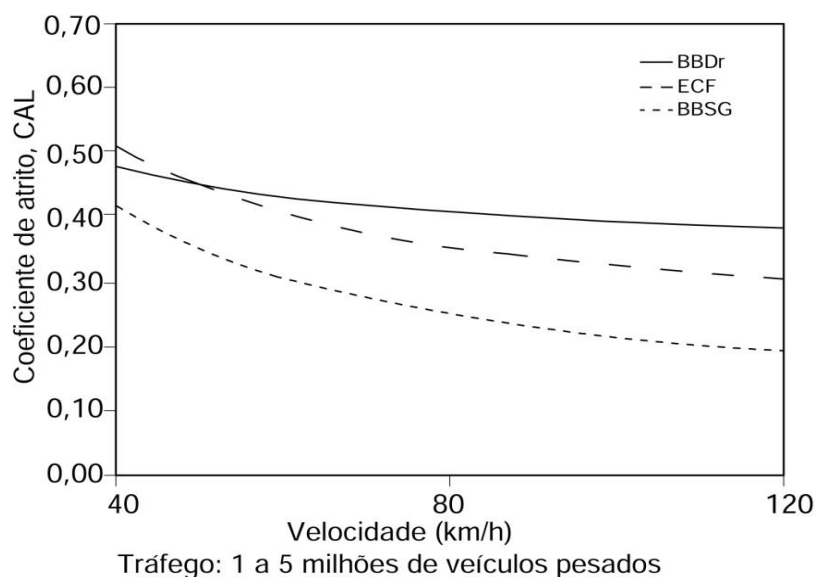


Figura 2.5. Valores de CAL em função da velocidade em três revestimentos diferentes (Brosseaud, 2005)

De acordo com a Figura 2.5, o revestimento drenante apresenta melhores características, pois garante um valor aproximadamente constante de coeficiente de atrito longitudinal com o aumento da velocidade. Tal é devido à boa drenagem que este tipo de revestimento apresenta. Por outro lado, o betão betuminoso tende a sofrer uma redução de coeficiente de atrito longitudinal (CAL) com o aumento da velocidade.

O atrito transversal tem também grande importância nos pavimentos rodoviários, sendo medido com equipamentos que utilizam pneus que efetuam um certo ângulo com a direção do deslocamento do veículo de ensaio (Branco *et al.*, 2011).

O coeficiente de atrito transversal é calculado a partir da imposição de um desvio com um ângulo, α , à roda que gira livremente com uma velocidade, V , em relação ao sentido do deslocamento. O seu valor é dado pelo quociente entre a força, F_x , perpendicular ao plano de rotação da roda e a reação normal ao solo que se opõe à carga do pneumático, F_z (Figura 2.6). A avaliação do atrito transversal é preponderante na identificação de zonas de atrito insuficiente (“pontos negros”); na programação da recuperação das características superficiais e na avaliação e estudo dos diferentes tipos de materiais e técnicas de construção (Pinto, 2003).

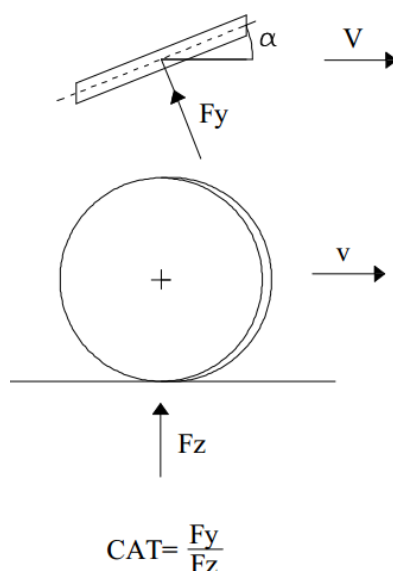


Figura 2.6. Coeficiente de atrito transversal (adaptado de OCDE, 1984).

Existem muitas variáveis que afetam a quantificação do coeficiente de atrito, mas este depende principalmente da velocidade de ensaio e da macrotextura.

Na tentativa de harmonizar os parâmetros de caracterização dos pavimentos, a “*Permanent International Association of Road Congress*” – PIARC, promoveu estudos no sentido de desenvolver um Índice Internacional de Atrito (IFI), que estabelece a medição do coeficiente de atrito a uma velocidade de referência de 60 km/h (FR60) e um parâmetro (S_p) relacionado com a textura, tendo por base o modelo apresentado na Figura 2.7. Desta forma, considera-se inicialmente um valor do coeficiente de atrito do pavimento, FRS,

obtido com um determinado equipamento a uma velocidade de ensaio, S , e um valor de textura, T_x . Com estes dados, através das equações 2.3, 2.4 e 2.5 corrige-se o valor de FRS em função da velocidade do equipamento (S) e do parâmetro relacionado com a textura (S_p), determinando assim o coeficiente de atrito à velocidade de referência de 60 km/h (PIARC/AIPCR, 1995, *cit. in* Pinto 2003).

$$FR60 = FRS \times e^{(S-60)/S_p} \quad (2.3)$$

$$S_p = a + b \times T_x \quad (2.4)$$

Onde:

T_x [mm] – profundidade da textura;

a, b – constantes que dependem do equipamento de medição de textura.

Após o cálculo dos valores da textura T_x e do coeficiente de atrito corrigido FR60, determina-se o IFI (F60) através da seguinte equação:

$$IFI = F60 = A + B \times FR60 + C \times T_x \quad (2.5)$$

Os parâmetros A, B e C são parâmetros específicos de cada equipamento. O parâmetro C é igual a zero nos equipamentos que utilizam um pneu liso.

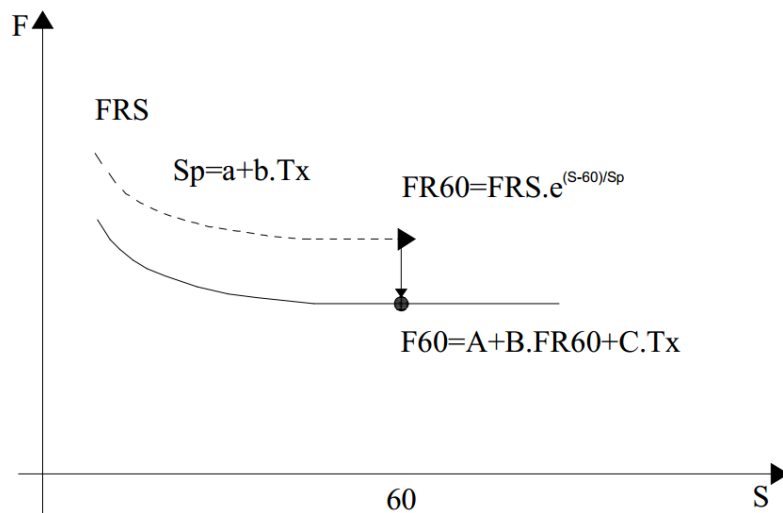


Figura 2.7. Determinação do IFI (adaptado de AIPCR/PIARC, 2003)

O atrito presente na superfície da camada de desgaste de um pavimento pode ser avaliado pontualmente ou com recurso a equipamento em movimento de registo contínuo. A medição do atrito pontual é efetuada com recurso ao Pêndulo Britânico, ou indiretamente (avaliação da textura) através do ensaio da mancha de areia (Branco *et al.*, 2011).

2.2.3.1. Equipamentos para determinação do coeficiente de atrito

A fim de proporcionar uma estrada mais segura, o engenheiro deve ser capaz de medir o coeficiente de atrito recorrendo a diferentes métodos e técnicas. Geralmente, os equipamentos para a medição de atrito são rebocáveis e fornecem valores de atrito de um ou mais pneus. Estes equipamentos podem ter os pneus bloqueados, simulando as condições de travagem com deslizamento dos pneus ou pneus livres para circularem com um certo ângulo em relação à direção de deslocamento do veículo. Os equipamentos para a medição direta do coeficiente de atrito podem ser agrupados nos seguintes grupos.

- Equipamentos portáteis;
- Equipamentos de rodas bloqueadas;
- Equipamentos de rodas oblíquas;
- Equipamentos de rodas parcialmente bloqueadas:
 - De deslizamento fixo
 - De deslizamento variável

Nesta dissertação, o ensaio da Mancha de Areia e o ensaio com o equipamento GripTester tomam especial relevância, no entanto são apresentados outros ensaios de medição do coeficiente de atrito de carácter meramente informativo.

- **Ensaio da Mancha de Areia**

Apesar de não ser um equipamento utilizado para determinar o coeficiente de atrito, este é apresentado neste subcapítulo pois permite a determinação da macrotextura fundamental na avaliação das características superficiais do pavimento. Este ensaio tem como finalidade determinar a profundidade média da altura da mancha de areia na superfície da camada de desgaste.

O ensaio da Mancha de Areia é realizado segundo a norma europeia EN 13036-1 (2001). Este consiste no preenchimento dos espaços vazios da textura superficial do pavimento recorrendo à utilização de pequenas esferas de vidro de dimensão normalizada, outrora

realizado com areia de granulometria obtida por passagem em peneiros normalizados. O resultado do ensaio é dado pela profundidade média de material espalhado, MTD, obtido com a aproximação de 0,05 mm, através da expressão 2.6 (Menezes, 2008).

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (2.6)$$

Onde:

MTD [mm] – profundidade média da textura superficial;

V [mm³] – volume de material espalhado;

D [mm] – diâmetro médio do círculo com o espalhamento do material.

No caso de a textura ser avaliada pelo ensaio da mancha de areia (avaliação pontual da textura) os valores de a e b na equação 2.4 corresponderão respetivamente a -11,6 e 113,6 (Mattos, 2009)

▪ **Pêndulo Britânico**

O Pêndulo Britânico (Figura 2.8) é um equipamento portátil que permite avaliar as características de aderência de um pavimento. Branco *et al.* (2011) definem o ensaio como uma medição localizada do coeficiente de atrito cinemático através da avaliação da energia cinemática absorvida por atrito quando uma superfície de borracha do pêndulo desliza sobre o pavimento, ou sobre uma amostra do material em estudo. Este ensaio deve seguir a norma europeia EN 13036-4.

O coeficiente de atrito é determinado simulando a resistência oferecida pela superfície do pavimento molhado à passagem de um veículo a uma velocidade de 50 km/h. A altura máxima atingida pelo pêndulo é identificada e indicará a leitura do coeficiente de atrito medido ou o Valor de Teste do Pêndulo (PTV – *Pendulum Test Value*) que representa indiretamente o atrito transversal entre o pneu e o pavimento e é proporcional à microrugosidade da superfície (Branco *et al.*, 2011).

No caderno de encargos das Estradas de Portugal (EP, 2009) é estabelecido um valor de referência logo após a construção da camada de desgaste de 60 PTV. Segundo Decreto Regulamentar nº3/2005, considera-se que se trata de uma zona com perigo de derrapagem se o valor PTV médio corrigido obtido for inferior a 35 PTV.

Figura 2.8. Pêndulo Britânico²

De acordo com o IFI – Índice Internacional de Atrito, para padronizar os resultados do ensaio deve recorrer-se à equação 2.7 considerando tratar-se de um ensaio de pêndulo britânico (Aps, 2006).

$$IFI = F_{60} = 0,056 + 0,008 \times FRS \times e^{\frac{S-60}{S_p}} \quad (2.7)$$

Onde:

FRS – coeficiente de atrito determinado pelo equipamento;

S [km/h] – velocidade de deslizamento;

S_p [km/h] – constante da velocidade de referência relacionado com a textura.

▪ GripTester

O *GripTester* é um equipamento (Figura 2.9) que permite a medição em contínuo do CAL, através de uma roda parcialmente bloqueada de deslizamento fixo. O ensaio consiste na medição das forças horizontais e verticais que são exercidas no pneu liso e bloqueado parcialmente com uma taxa de 15% em relação à rotação das restantes rodas do aparelho, quando este se desloca sobre um pavimento, em condições normalizadas relativamente à velocidade e espessura da película de água (Menezes, 2008). A Tabela 2.4 aponta algumas das condições padrão para a realização deste ensaio.

² <http://www.highwaysmaintenance.com/>, consultado a 22 -02 - 2015

O equipamento é rebocado por um veículo equipado com um depósito de água com capacidade de 400 a 1000 litros e um dispositivo controlador de vazão. A água é espalhada sobre a roda de ensaio de modo a garantir uma película de espessura mínima igual a 0,5 mm. As forças verticais e horizontais são medidas continuamente por tensiómetros cujos valores calculados são apresentados no monitor do computador de bordo a cada 10 ou 20 metros de levantamento, assim como os valores médios da velocidade do veículo rebocador (Couchinho, 2011).

A expressão utilizada pelo GripTester para o cálculo do coeficiente de atrito, dado pelo valor do *Grip Number* (GN) é:

$$GN = \frac{F_z}{F_x} \quad (2.8)$$

Onde:

GN – *Grip Number* (coeficiente de atrito);

F_z [kgf] – força vertical;

F_x [kgf] – força horizontal.

O *Grip Number*, GN, pode variar entre 0 e 1,2, dependendo do pavimento e da velocidade do ensaio.



Figura 2.9. Equipamento “GripTester”³

³ <http://griptester.us/>, consultado a 27 -11 - 2014

Tabela 2.4. Condições normais de ensaio com o GripTester (Do & Roe, 2008)

Temperatura do ar	>4°C
Temperatura do pavimento	>5°C e <50°C
Estado do pavimento	Sem nenhuma poluição
Roda do teste	Pneu liso – 254 mm de Ø – Pressão 0,14 MPa
Método	Taxa de deslizamento constante de 15%
Carga estática na roda de teste	250±20 N
Velocidade de operação	5 a 100 km/h
Película mínima de água teórica	0,5 mm
Comprimento mínimo de teste	10 m ou 20 m

Os resultados devem ser obtidos a pelo menos duas velocidades distintas de modo a se ter uma melhor avaliação do atrito numa superfície molhada, pois a influência da macro e microtextura pode gerar diferentes resultados de acordo com a velocidade. Com o aumento da velocidade de medição o coeficiente de atrito tende a diminuir, facto que é tanto mais evidente quanto pior for a macrotextura do pavimento. Para padronizar os resultados do ensaio de acordo com o IFI, deve recorrer-se à equação 2.9 (Aps, 2006).

$$IFI = F_{60} = 0,0821 + 0,9104 \times GN \times e^{\frac{S-60}{S_p}} \quad (2.9)$$

Onde:

GN – *Grip Number* (Coeficiente de atrito);

S [km/h] – velocidade de deslizamento;

S_P [km/h] – constante da velocidade de referência.

▪ Surface Friction Tester

O *Surface Friction Tester* é um veículo (Figura 2.10) que permite a medição em contínuo do coeficiente de atrito longitudinal, através de uma quinta roda instalada no eixo traseiro parcialmente bloqueada com 15% de deslizamento. O veículo tem também um sistema de aspersão de água que aplica uma lâmina de água com espessura de 1 mm (Couchinho, 2011). O método de ensaio está descrito na norma ASTM E1551-08. A Tabela 2.5 aponta algumas das condições padrão para a realização deste ensaio.



Figura 2.10. *Surface Friction Tester* ⁴

Tabela 2.5. Condições normais de ensaio de *Surface Friction Tester* (Do & Roe, 2008)

Temperatura do ar	>5°C
Temperatura do pavimento	> 5°C
Estado do pavimento	Sem nenhuma poluição
Roda do teste	Trelleborg T49 com pressão de 0,14 MPa
Método	Taxa de deslizamento constante de 17%
Carga estática na roda de teste	1000 N
Velocidade de operação	70 km/h
Película de água teórica	0,5mm
Comprimento mínimo de teste	20m

▪ BV-11 Skiddometer

O *BV-11 Skiddometer* (Figura 2.11) consiste num reboque que permite a medição em contínuo do coeficiente de atrito longitudinal com pavimento molhado com cerca de 1 mm de espessura de água. O ensaio realiza-se com uma taxa de deslizamento do 17% da roda de teste (Couchinho, 2011).

O equipamento é constituído por três rodas em linha, sendo que a roda central é a de ensaio e serve para as medições do coeficiente de atrito. Através de um sensor são recolhidos os coeficientes de atrito e posteriormente processados e armazenados por um computador no interior do veículo rebocador. Para padronizar os resultados deste ensaio segundo o IFI, deve recorrer-se à equação 2.10 (Aps, 2006).

$$IFI = F_{60} = 0,04 + 0,856 \times FRS \times e^{\frac{S-60}{S_p}} - 0,016T_x \quad (2.10)$$

⁴ <http://www.airport-technology.com>, consultado a 10 - 04 - 2015

Onde:

FRS – coeficiente de atrito determinado pelo equipamento;

S [km/h] – velocidade de deslizamento;

S_P [km/h] – constante da velocidade de referência

T_x [mm] – profundidade da textura, determinado a partir de valores da macrotextura em função do equipamento utilizado.



Figura 2.11. BV – 11 Skiddometer⁵

▪ SCRIM

O SCRIM (*Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine*) é um equipamento de rodas oblíquas (com determinado ângulo em relação ao sentido do deslocamento do equipamento) dos mais utilizados em Portugal na medição do atrito em contínuo (Figura 2.12).

Trata-se de um sistema completamente auto-suficiente que permite medir o coeficiente de atrito transversal (CAT) de uma superfície molhada segundo o descrito na norma britânica BS 7941-1:2006. O chassi do veículo comercial é dotado com um tanque de água de grande capacidade (Figura 2.13). É o equipamento ideal para inspecionar diariamente uma grande extensão (200 a 300 km), dependendo do tipo de estrada⁶.

A roda de ensaio está equipada com pneu liso de dureza normalizada localizada a meio do veículo (Figura 2.13) sendo aplicada com determinada carga, também normalizada e com

⁵ <http://www.airport-technology.com>, consultado a 10 -04 – 2015

⁶ <http://www.wdm.co.uk>, consultado a 27 -11 - 2014

um ângulo de 20° em relação ao eixo longitudinal do veículo. Um fluxo controlado de água molha a superfície, de modo a proporcionar uma película de água de 0,5 a 2 mm de espessura nominal⁶. A Tabela 2.6 aponta algumas das condições padrão para a realização deste ensaio.



Figura 2.12. Vista geral do equipamento SCRIM⁶

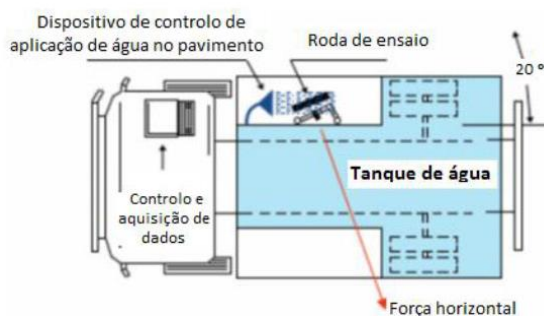


Figura 2.13. Organização do SCRIM (Couchinho, 2011)

Segundo Couchinho (2011), a velocidade de ensaio pode variar entre os 40 e os 140 km/h sendo que os dados são registados e armazenados continuamente por um computador no interior do veículo. O sistema de aquisição e tratamento de dados determina para cada intervalo mínimo de 10 m, durante oito intervalos de igual duração, os valores de coeficiente de atrito transversal, a velocidade real e média.

De acordo com Aps (2006) e considerando tratar-se de um SCRIM (F) para padronizar os resultados do ensaio deve recorrer-se à equação 2.11.

$$IFI = F_{60} = -0,006 + 0,862 \times FRS \times e^{\frac{S-60}{S_p}} \quad (2.11)$$

⁶ <http://www.wdm.co.uk>, consultado a 27 -11 - 2014

Onde:

FRS – coeficiente de atrito determinado pelo equipamento;

S [km/h] – velocidade de deslizamento determinado por $S = V \sin \alpha$;

V [km/h] – velocidade do veículo;

α [°] – ângulo em relação ao eixo longitudinal do veículo;

S_P [km/h] – constante da velocidade de referência;

T_x [mm] – profundidade da textura, determinado a partir de valores da macrotextura em função do equipamento utilizado.

Tabela 2.6. Condições normais de ensaio de SCRIM (Do & Roe, 2008)

Temperatura do ar	>4°C
Temperatura do pavimento	> 5°C e <50°C
Estado do pavimento	Sem nenhuma poluição
Roda do teste	Pneu liso – 76/508 mm de \varnothing – Pressão 0,35 MPa
Método	Taxa de deslizamento constante de ângulo de deslizamento
Ângulo de deslizamento	20°
Carga estática na roda de teste	1960 N
Velocidade de operação	Varia de país para país. Normalmente 50 km/h é usado como uma velocidade de referência, mas outras velocidades são por vezes utilizadas na operação por razões de segurança.
Película de água teórica	0,5 mm
Comprimento mínimo de teste	10 m

Capítulo 3

MECANISMOS DE INTERAÇÃO VEÍCULO – PAVIMENTO

3. Mecanismos de interação veículo-pavimento

São vários os estudos que indicam que o comportamento humano é o fator com maior influência nos acidentes rodoviários (aproximadamente 95%), mas a infraestrutura e o ambiente rodoviário têm, também uma contribuição significativa (28% no Reino Unido e 34% nos Estados Unidos). Em Portugal, de acordo com o Plano Nacional de Prevenção Rodoviária, a influência da infraestrutura nos acidentes rodoviários situava-se, em 2008, entre os 40% e 75% (Fernandes & Neves, 2008). Deste modo, os acidentes rodoviários são, ainda hoje, considerados um problema de saúde pública que têm exigido esforços na formação de uma prevenção eficaz e sustentável (Shen *et al.*, 2014).

Neste capítulo são estudados os mecanismos de interação veículo–pavimento através da aderência concebida, fundamentalmente, pelo atrito da camada superficial, e os sistemas ativos integrados nos veículos mais modernos que asseguram a máxima interação veículo-pavimento.

3.1. Aderência pneu-pavimento

A aderência entre o pneu e o pavimento é a característica da infraestrutura que mais influência a segurança dos utentes que circulam na estrada, pois garante a resistência à derrapagem necessária para que o veículo conserve, a todo o momento, a trajetória desejada.

O mecanismo de geração de atrito de um pneu ocorre devido à adesão e à histerese entre o pneu e a estrada na área de contato, estando ambos relacionados com a velocidade (Wilson, 2006). A adesão surge devido à formação de ligações químicas entre a borracha do pneu e o agregado do pavimento da estrada, enquanto a histerese ocorre devido à deformação do pneu sobre uma superfície da estrada (Hamersma & Els, 2014).

Na Figura 3.1 estão ilustradas as componentes de adesão e de histerese, assim como o desgaste provocado pela desagregação de partículas do pneu na superfície de contacto com o pavimento (Silva, 2008).

A força de histerese deve-se ao fenómeno que ocorre na zona de contacto entre o pneu e o pavimento, quando as ranhuras da borracha se envolvem com as rugosidades da superfície do pavimento. Neste processo, a borracha acumula-se nas extremidades das irregularidades do pavimento durante o deslocamento provocando a perda de contacto na face inferior. A

distribuição assimétrica de pressões devido às irregularidades gera uma força que se opõe ao deslocamento, a força de histerese, que causa a perda de energia do sistema sob forma de calor e ruído. Esta força é controlada pela macrotextura da superfície (Couchinho, 2011; Wilson, 2006).

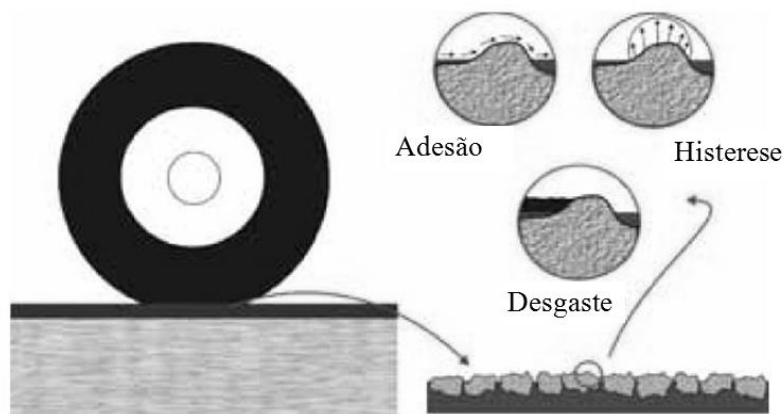


Figura 3.1. Mecanismos de adesão, histerese e desgaste (Silva, 2008)

A adesão está diretamente relacionada com a produção de forças adesivas entre as moléculas das duas superfícies em contacto, cuja magnitude depende da microtextura, da temperatura e do tempo de contacto entre elas, portanto da velocidade de deslocamento (Pereira, Soares, Pontes-Filho & Branco, 2012).

Quando o pavimento se encontra molhado, a presença de água impede a formação de ligações químicas moleculares na interface do agregado e do pneu consequentemente a componente de adesão é significativamente reduzida (quase a zero), o que resulta numa redução do atrito disponível. Embora o pneu tenda a comprimir a água para fora da superfície de contacto, este processo é incompleto pois as ligações moleculares são formadas apenas quando a microtextura se projeta para além da película de água. Portanto, em condições de piso molhado, a componente de histerese é a componente mais significativa de resistência à derrapagem existente para resistir a forças instabilizadoras do veículo (Wilson, 2006).

A aderência depende de vários fatores nos quais se destacam, a textura superficial e o atrito pneu/ pavimento, mas também depende do grau de desgaste, da pressão de enchimento e do tipo dos pneus (constituição, composição e qualidade da borracha), da velocidade de circulação, da presença e da espessura da película de água no pavimento, de outros tipos de

depósitos existentes no pavimento e da época do ano (Pinto, 2003; Silva, 2009). Pereira *et al.* (2012) acrescentam ainda que as características geométricas da via são um dos fatores que também devem ser tidos em conta na análise da aderência pneu-pavimento.

Crisman e Roberti (2012) defendem que os pavimentos com alta resistência à derrapagem contribuem para a redução da ocorrência de acidentes, porém é necessário ter à disposição pavimentos que possam garantir níveis padronizados (Exemplo do Reino Unido) de resistência à derrapagem adequados em todos os tipos de traçado (intersecções, curvas, retas, rotundas entre outras).

Em Portugal, de acordo com Fernandes e Neves (2008), os indicadores utilizados na avaliação da qualidade das características funcionais dos pavimentos das estradas nacionais são a textura e a resistência à derrapagem. Em relação às novas estradas, a Estradas de Portugal (EP) e a BRISA estipulam, nos respetivos Cadernos de Encargos, valores mínimos para a macrotextura (avaliada pelo ensaio de Mancha de Areia) e para resistência à derrapagem (Figura 3.1). Relativamente às estradas em exploração, os requisitos de qualidade estão normalmente relacionados com os sistemas de gestão de pavimentos adotados, sendo que, no caso das estradas concessionadas o mesmo faz parte do contrato de concessão.

Tabela 3.1. Valores normativos mínimos de textura e resistência à derrapagem (adaptado de Fernandes & Neves, 2008)

Propriedade	Método		Valor mínimo	
			EP	Brisa
Textura	Mancha de areia	Betão betuminoso	>0,6	>0,6
		Betão betuminoso drenante	>1,2	Não especificado
		Microbetão betuminoso	>1,0	>1,0
Resistência à derrapagem	SCRIM		>0,4 (50 km/h)	0,5
			>0,2 (120 km/h)	
	Pêndulo Britânico		>0,55	Não especificado

3.2.Deslizamento longitudinal e dinâmica do veículo

Como já referido ao longo deste trabalho, durante o movimento de um veículo, diferentes forças entre os pneus e o pavimento são transmitidas das seguintes formas:

- Forças normais à superfície da estrada (forças verticais);
- Forças paralelas (forças horizontal).

As forças horizontais podem ser projetadas na direção tangencial (paralelamente ao percurso de deslocamento do veículo) ou na direção radial (perpendicular ao trajeto de marcha do veículo). As ações do condutor resultam em reações do veículo, atuando de novo sobre o condutor, que é então forçado a tomar novas medidas, e assim por diante. Além disso, o condutor do veículo está sujeito a diferentes perturbações e fatores ambientais, tais como:

- Geometria da estrada (curvas, notas, superelevação);
- Características do pavimento (material de revestimento, a macrotextura e microtextura, a resistência do material e dos materiais de fundações subjacentes);
- As condições meteorológicas (chuva, neve, gelo e condições ambientais, tais como a presença de contaminantes).

Quando o condutor aplica os travões (aplicação do binário), a velocidade angular (ω), adquirida pelas rodas, diverge da velocidade do veículo. A diferença entre a velocidade de movimento livre da roda (V) e a velocidade linear do ponto de contacto com o solo (V_w), que depende do raio efetivo (r_{eff}) (Figura 3.2), designa-se por deslizamento longitudinal (equação 3.1).

Na Figura 3.2 estão representados o desenvolvimento da força vertical, da força longitudinal, do deslizamento e da velocidade angular do pneu na travagem ($\omega \neq 0$). Também é possível visualizar a existência de três tipos de raio (Almeida, 2013):

r_0 – raio nominal, correspondente ao raio do pneu sem carga vertical;

r_{sta} – raio estático, corresponde ao raio do pneu com carga vertical;

r_{eff} – raio efetivo, ou também designado de raio de rolamento. Segundo Castro (2008), o raio efetivo pode ser obtido pela relação, $r_{eff} = r_0 - \left(\frac{r_0 - r_{sta}}{3}\right)$.

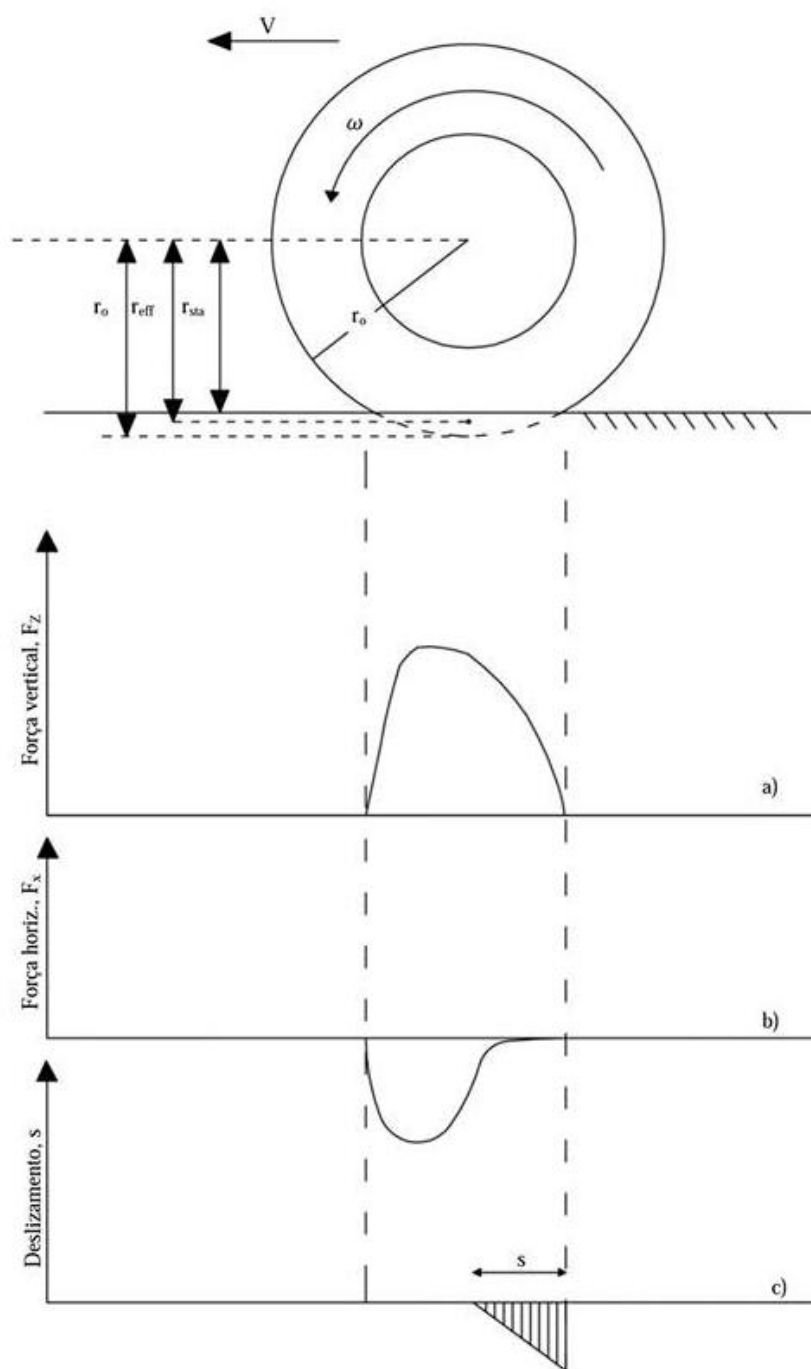


Figura 3.2. Estrutura de deformação de pneu, raios respetivos e forças na interação com o pavimento (baseado em Almeida, 2013; Linhares, 2015)

A força vertical (Figura 3.2 a)) aplicada na roda aumenta ao longo da área de contacto entre o pneu e pavimento, sendo que é máxima num ponto um pouco à frente do centro da roda devido à pressão de travagem exercida.

A força longitudinal (força de tração) (Figura 3.2 b)) vai diminuir até atingir um limite a partir do qual a força vertical diminui e o pneu entra em deslizamento (Figura 3.2 c)). O material do pneu volta ao seu estado inicial (menor contacto com o solo) como consequência do aumento da força horizontal (até zero).

$$s = \frac{V - V_w}{V} = \frac{V - \omega_D \cdot r_{eff}}{V} \quad (3.1)$$

Sendo:

r_{eff} [m] – raio efetivo da roda;

ω_D [rad/s] – velocidade angular da roda;

V_w [m/s] – velocidade linear do contacto com o solo;

V [m/s] – velocidade do movimento livre do pneu.

Com as diferenças de velocidades que se verificam devido à deformação do pneu assume-se que V_w é diferente de V (Figura 3.2).

A força de tração que se desenvolve na superfície do pneu a partir do início da travagem provoca o deslizamento longitudinal deste sobre o pavimento. A Figura 3.3 ilustra as curvas do coeficiente de atrito (μ) *versus* deslizamento longitudinal (s) provocadas pela travagem, onde se verifica que o coeficiente de atrito aumenta linearmente e, nesta circunstância, a roda encontra-se em rolamento livre com velocidade angular diferente de zero, ω_L , até ao valor máximo que é atingido numa faixa de deslizamento de 10 a 25%, a partir daí o veículo apresenta uma condição instável e o valor de coeficiente de atrito decresce até ao valor designado por coeficiente de atrito de deslizamento crítico (μ_{crit}) onde a roda fica totalmente bloqueada (Silva, 2008).

Na Figura 3.3 a) é apresentada a influência da variação do peso do veículo no comportamento das curvas μ - s . Verifica-se que os valores do coeficiente de atrito obtidos para diferentes cargas verticais são bastante semelhantes pelo que se pode afirmar que o valor é independente da carga. Por outro lado, na Figura 3.3 b) a mudança das condições superficiais de pavimento (seco ou molhado) provoca grandes variações no coeficiente de atrito obtido (Toresan, 2007).

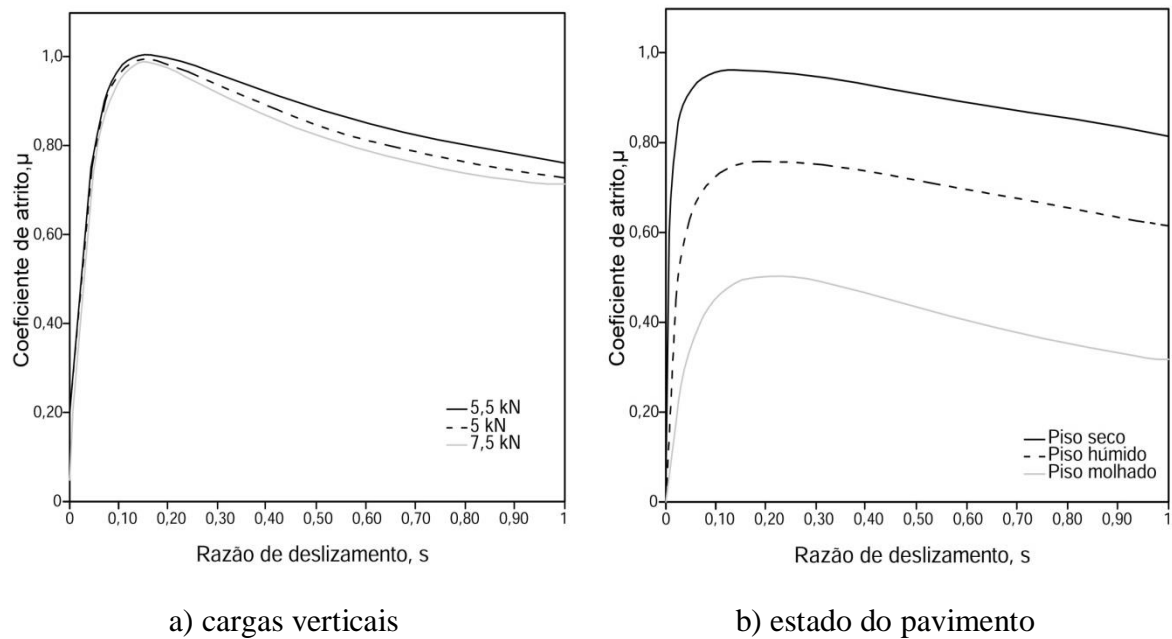


Figura 3.3. Curvas μ - s para diferentes cargas verticais e condições do pavimento (Hamersma & Els, 2014; Toresan, 2007)

Um sistema de travagem deverá fornecer um valor de coeficiente de atrito máximo num maior período de tempo possível, de modo a estabilizar o veículo e garantir uma menor distância de travagem. O sistema mais conhecido que garante esta condição é o sistema ABS (Toresan, 2007; Hamersma & Els, 2014; Henry, 2000).

3.3. Hidroplanagem

A hidroplanagem ocorre quando os pneus perdem o contacto com o pavimento. Este fenómeno ocorre nos pavimentos molhados onde a aderência é reduzida devido à presença de uma lâmina de água. Na área de contacto do pneu com o pavimento desenvolvem-se pressões hidrodinâmicas, resultado da dificuldade do pneu e do pavimento em conseguir expulsar toda a água pisada pelo pneu (Figura 3.4). Os pneus deixam de rodar sobre a superfície devido à descontinuidade pneu-pavimento e passam a flutuar e a escorregar (Soares, 2011).

O atrito nos pavimentos molhados é inferior ao encontrado quando o pavimento está seco. Tal deve-se à existência de fluido entre o pavimento e o pneu. A fina película de água reduz substancialmente a adesão, componente principal do atrito, descrita anteriormente.

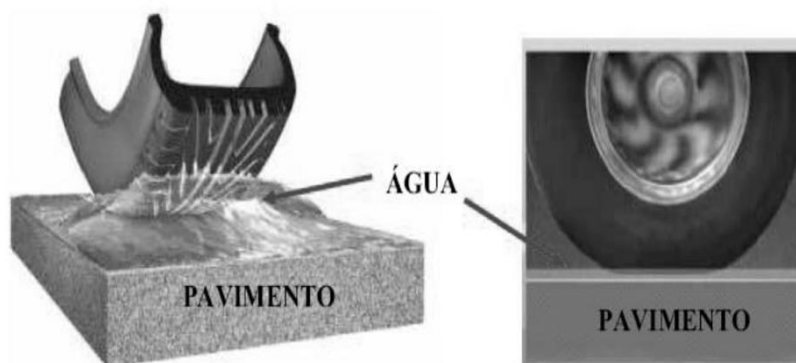


Figura 3.4. Representação gráfica da hidropneumática (Silva, 2008)

Com o aumento da velocidade, reduz-se o tempo de contacto do pneu com o pavimento e também diminui o tempo disponível para que o processo de expulsão de água se complete, deste modo, o atrito em pavimentos molhados diminui com o aumento da velocidade e é proporcional à área da zona onde ocorre efetivamente o contacto direto entre pneu e o pavimento. Mesmo que esse contacto direto ocorra em áreas muito pequenas, o atrito disponível é proporcional ao somatório dessas pequenas áreas (Francisco, 2009).

A Figura 3.5 ilustra a relação do comportamento do atrito, em função da velocidade de deslocamento, na presença de água sobre a superfície do pavimento. Segundo o estudo de Comfort (2001), a partir da velocidade de hidropneumática (V_h) o atrito é praticamente nulo.

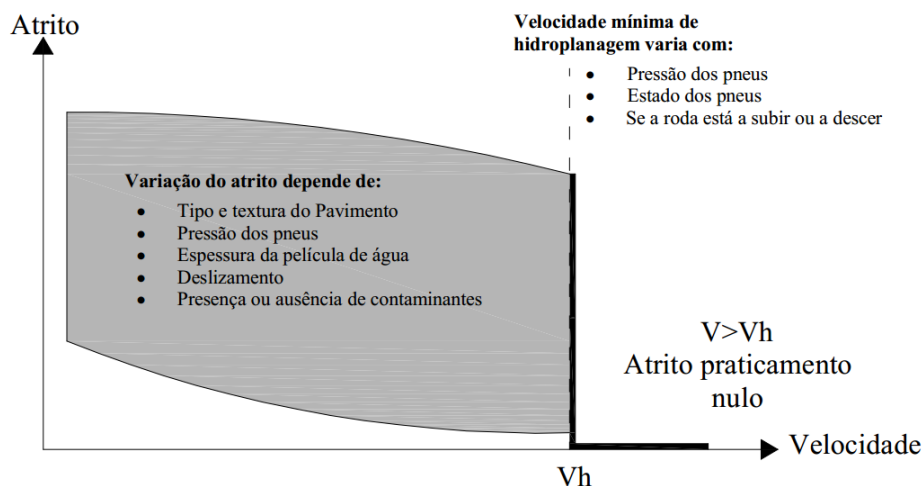


Figura 3.5. Comportamento do atrito em função da velocidade em pavimento molhado (adaptado de Comfort, 2001)

De acordo com Rodrigues-Filho (2006), existem quatro tipos de hidroplanagem:

- Viscosa;
- Dinâmica;
- Com desvulcanização;
- Real/Combinada.

A hidroplanagem viscosa ocorre para velocidades relativamente baixas devido à viscosidade da água se opor à sua expulsão da área de contacto entre o pneu e o pavimento. Ocorre em superfícies lisas e, portanto ocorre com maior frequência nos pavimentos polidos, densos e nas áreas impregnadas por borracha resultante do desgaste dos pneus (*i.e.* superfícies lisas) (Rodrigues-Filho, 2006). Em geral, este tipo de hidroplanagem ocorre durante a travagem, mesmo que a película de água seja muito fina (espessura da ordem de 0,06mm) (Salpico, 2010).

A hidroplanagem dinâmica ocorre quando um veículo se desloca sobre um pavimento cuja superfície se encontra coberta de água. Nestas condições, o pneu do veículo desloca a água para a frente e para os lados com o objetivo de estabelecer o contacto entre o pneu e o pavimento e assim poder avançar (Soares, 2011). Na parte da frente, o pneu embate na água formando uma onda de pressão com intensidade correspondente ao impulso transmitido pelo pneu à água. Esta pressão é proporcional ao quadrado da velocidade linear da roda e deforma o pneu de tal modo que, as porções de água subsequentes são capazes de penetrar na área de contacto entre o pneu e o pavimento e sustentar parcialmente a carga vertical do pneu (Rodrigues-Filho, 2006).

A hidroplanagem com desvulcanização é mais frequente verificar-se em aeronaves, pois ocorre quando a velocidade de deslocamento de um veículo é superior à velocidade de hidroplanagem devido à rotação inexistente e à macrotextura do pavimento, a borracha na área de contacto fica sujeita a repetidas deformações locais, como o pneu possui propriedades visco-elásticas este sobreaquece na área de contacto. Caso este processo perdure algum tempo, a temperatura na área de contacto pode alcançar um nível em que a borracha perde as suas qualidades elásticas e plastifica (Soares, 2011).

Por fim, a probabilidade de ocorrerem individualmente os fenómenos de hidroplanagem dinâmica e viscosa é muito reduzida. O mais provável é os dois fenómenos ocorrerem simultaneamente. Pesquisas realizadas pela NASA (*National Aeronautics and Space*

Administration) mostram que dentro da área de contacto entre o pneu e o pavimento, existem três zonas distintas apresentadas na Figura 3.6 (Rodrigues-Filho, 2006):

- Na zona 1 não existe contacto devido à presença da película de água;
- Na zona 2 foi eliminada grande parte da quantidade de água, restando uma película descontínua atravessada por algumas irregularidades do pavimento (microtextura). Ocorre o restabelecimento do contacto entre o pneu e o pavimento;
- Na zona 3 existe um contacto praticamente seco entre o pneu e o pavimento, ainda que exista uma pequena percentagem de água que irá evaporizar.

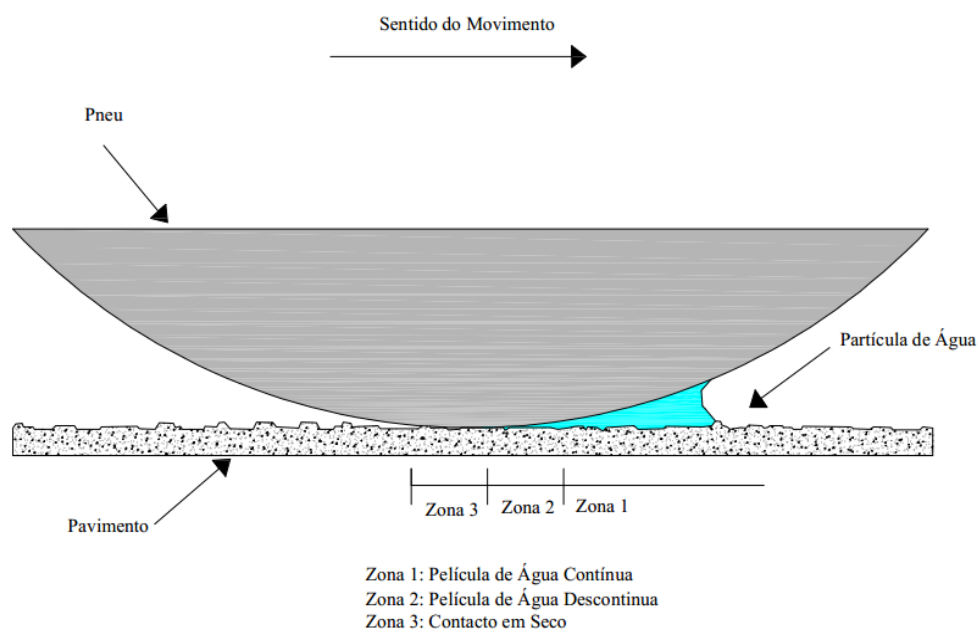


Figura 3.6. Zonas de interação pneu/pavimento com piso molhado (adaptado de Achútegui, 2002)

O risco de derrapagem nos pavimentos molhados tem sido objeto de vários estudos e tem-se tentado reduzir de duas formas. Por um lado, melhorando as propriedades dos pneus e os sistemas de travagem (apresentado nos subcapítulos seguintes), por outro, estudando os mecanismos de aderência entre o piso dos pneus e os pavimentos.

3.4. Influência dos pneus

Jellie (2003, *cit. in* Wilson 2006) afirma que o estudo da resistência à derrapagem deve incluir uma abordagem sobre a contribuição do pneu na interação pneu-pavimento. Segundo a análise de Segel (1977, *cit. in* Wilson 2006) a interação pneu-pavimento aponta para que a probabilidade de derrapagem seja maior para velocidades mais elevadas, espessuras de películas de água altas, baixas micro e macrotextura e para manobras bruscas.

Os pneus modernos permitem uma maior rapidez das viagens, mais conforto proporcionado melhor absorção de choque, transferência de carga e de tração (Wilson, 2006). Os perfis dos pneus são projetados para atender ao tipo veículo (carro comercial ou de passageiros) e ao tipo de superfície de rolamento (estrada pavimentada, todo-o-terreno e neve) em que vão funcionar (Wilson, 2006).

Os pneus são constituídos por 7 partes, dispostas de acordo com a Figura 3.7. O piso é o elemento que fica em contacto com a superfície do pavimento e é composto por cinco partes (Figura 3.7 (b)) definidas no Decreto-lei n.º72 – C de 2003. Estes são desenvolvidos através de tecnologias inovadoras e constituem o único ponto de união entre o veículo e o solo. A maior parte da força aplicada pelo solo no pneu é absorvida pela compressão do ar no seu interior (CEPRA, 2000a).

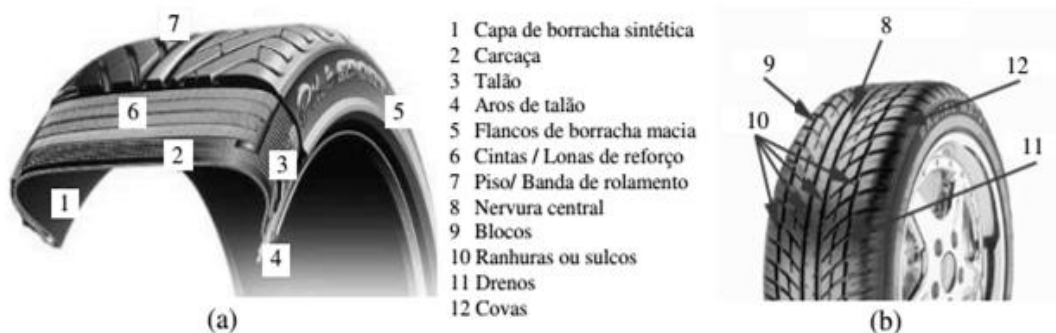


Figura 3.7. Constituição de um pneu (a) e do respetivo piso (b). (Freitas *et al.*, 2007)

O pneu deve garantir algumas funcionalidades tais como: a capacidade de transportar carga, a transmissão da força de propulsão do motor, a absorção das irregularidades da estrada (melhorando o amortecimento), a capacidade de travagem, a resposta às ações do volante,

manter a direção e a tração em todos os terrenos, a durabilidade e a estabilidade dimensional, a aderência, a proteção lateral e resistência a furos⁷.

Os padrões do piso de rolamento são baseados em nervuras em forma de circunferência separadas por ranhuras grandes o suficiente para acomodar a água deslocada sem desenvolver uma pressão hidrostática entre a superfície da banda de rolamento e a estrada.

Veith (1983, *cit. in* Wilson 2006) relacionou a fração de volume total ocupada pelas nervuras, a área abrangida pelo desenvolvimento das nervuras e a banda de rodagem com a profundidade do piso, h_G , através do valor do volume da ranhura fracionária (ϕ_V) apresentada na equação 3.2.

$$\phi_V = \phi_A \frac{h_G}{10} \quad (3.2)$$

Onde:

ϕ_V – volume de ranhura fracionária;

ϕ_A – fração da área das ranhuras;

h_G [mm] – profundidade do piso.

Segundo Veith (1983, *cit. in* Wilson 2006), os pneus projetados para a obtenção de um bom desempenho sob tração crítica exigem padrões de piso com um valor de ϕ_V entre os 0,30 e os 0,35. A Figura 3.8 a) e b) realça a importância do volume de ranhuras no padrão da banda de rodagem no valor do coeficiente de atrito, ilustrando o desempenho de dois pneus selecionados com diferentes volumes de ranhura (pneu A com $\phi_V=0,18$ e pneu B com $\phi_V=0,41$), em duas superfícies distintas (S com boa macrotextura e microtextura e H com baixa macrotextura e microtextura), a várias velocidades (V) e ângulos de escorregamento dos pneus (β em graus).

O pneu B tem maior volume de vazios (ranhuras) e apresenta um bom desempenho mesmo na superfície H, esta superfície apresenta uma diminuição de coeficiente de atrito, μ , em curva e em alta velocidade.

⁷ <http://www.confortauto.pt>, consultado a 28-01-2015

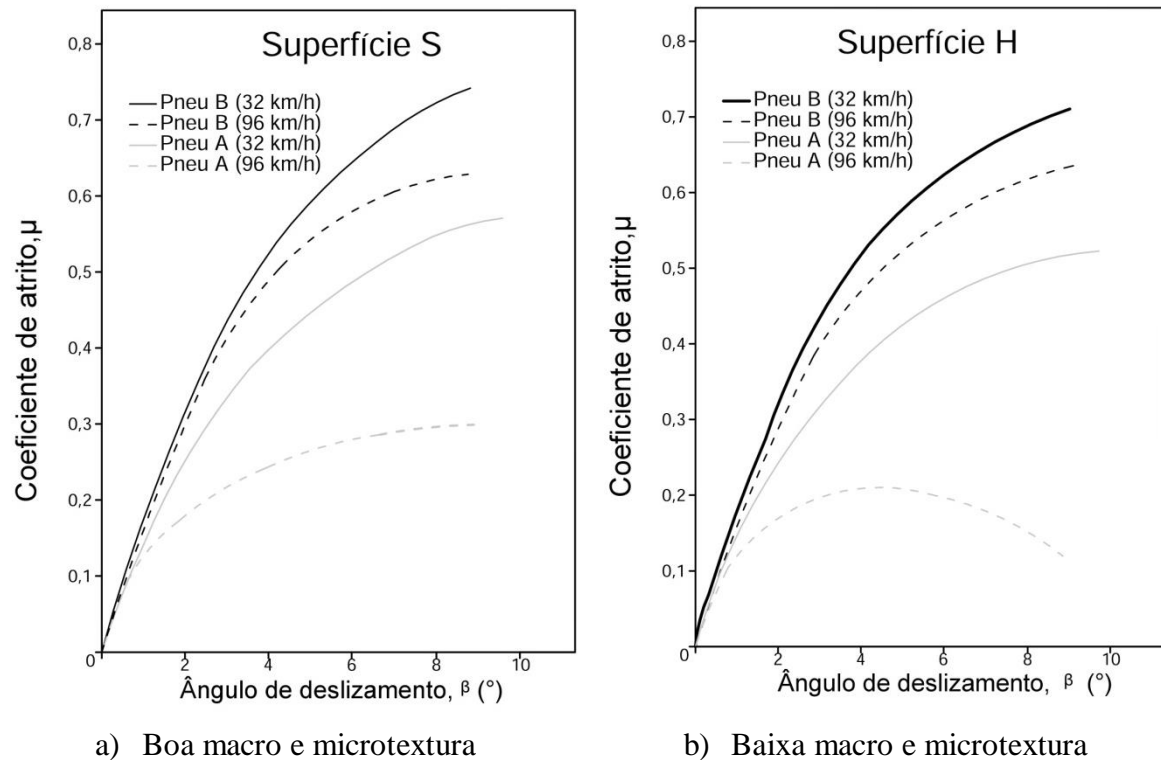


Figura 3.8. Comparação do desempenho de dois pneus com volumes de ranhuras diferentes em duas superfícies de rodagem (adaptado de Veith, 1983)

O grau de dureza da borracha do pneu influencia o desempenho de tração (atrito). As borrachas mais macias proporcionam maiores valores de atrito. No entanto, em velocidades elevadas e na presença de películas de água o pneu com maior dureza proporciona valores mais elevados de atrito. Neste caso, a borracha mais dura resiste à deformação elástica proporcionando um melhor desempenho em comparação com a borracha macia (Figura 3.9). A Figura 3.9 resulta de ensaios realizados a uma velocidade de 80km/h em seixos lisos molhados com os quatro tipos de pneus mais utilizados (Veith, 1983, *cit. in* Wilson 2006):

- Borracha de butil ou de isobutileno -isopreno (BUTYL);
- Borracha de butadieno - estireno (SBR);
- Borracha natural (NR);
- Borracha polibutadieno (BR).

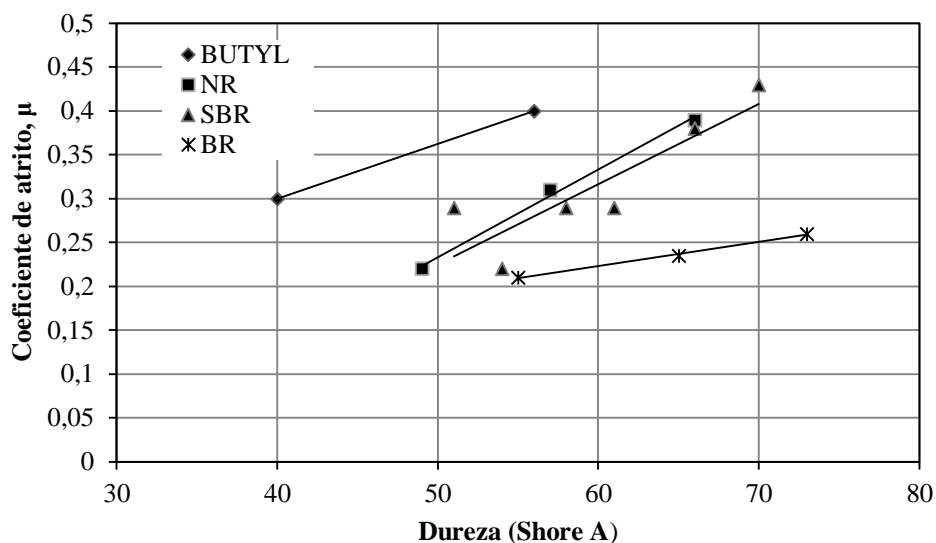


Figura 3.9. Coeficiente de atrito molhado em curva em função da dureza da borracha do pneu (Veith,1983)

Assim, a tração originada entre o pneu e o pavimento é influenciada pelo tipo de borracha do pneu sendo esta dependente da estrutura e propriedades químicas.

3.5. Mecanismos ativos de controlo de travagem e estabilidade

A segurança rodoviária é melhorada consideravelmente graças ao recurso de sistemas inteligentes (Figura 3.10). Estes sistemas de segurança proporcionam a todos os passageiros maior segurança em condições críticas adversas (Miller, 2014).

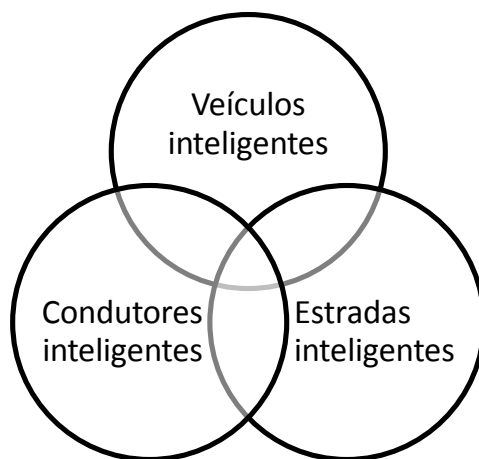


Figura 3.10. Relação de segurança rodoviária inteligente (adaptado de Miller, 2014)

Os sistemas de segurança passiva atuam, essencialmente na proteção dos ocupantes da viatura. O aumento deste tipo de segurança é responsável por uma redução substancial do número de vítimas que ocorre durante e após o acidente, incluindo em situações de colisão

e capotamento. Estes sistemas de segurança dividem-se em dois tipos, o primeiro intitulado de sistemas primários que inclui o cinto de segurança e o encosto de cabeça, e o segundo designado como sistemas de retenção secundários (SRS) que engloba o sistema de pré-tensão aos cintos de segurança, os “airbags”, os sistemas de retenção infantil e as estruturas com deformação progressiva que consiste numa carroçaria que é deformável por um lado e resistente por outro, possibilitando a absorção de energia na colisão e evitando que os materiais sólidos invadam o interior do veículo e causem ferimentos aos ocupantes (IMTT, 2010b).

Por outro lado, existem os sistemas de segurança ativa que têm como principal objetivo atuar antes que um acidente ocorra e assim diminuir o número de acidentes rodoviários (Jarasuniene & Jakubauskas, 2007). A Figura 3.11 representa a evolução ao longo de três gerações dos sistemas avançados de assistência ao condutor (ADAS) que exigem atuadores mecatrónicos integrados no sistema de chassis, desde ABS (sistema de travagem anti-bloqueio), AFS (direção frontal ativa), sensores, e câmara de vídeo (Isermann, Mannale & Schmitt, 2012).

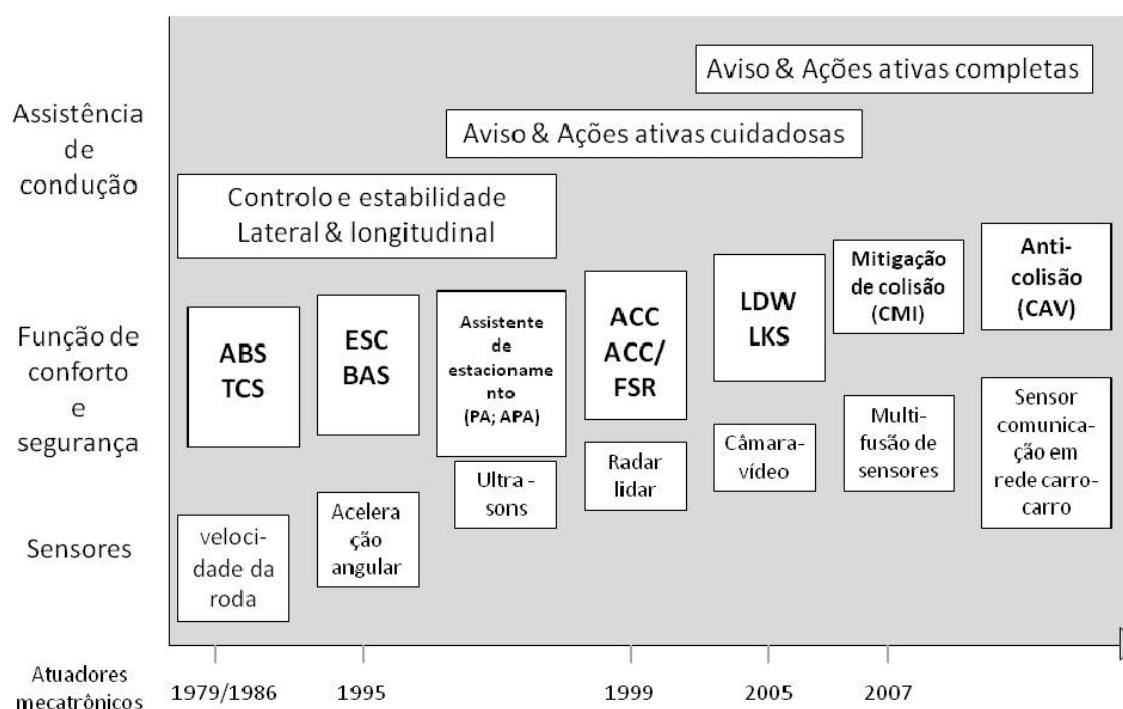


Figura 3.11. Cronologia do desenvolvimento de sistemas de assistência ao condutor: três gerações (adaptado de Isermann *et al.*, 2012)

A primeira geração é descrita por “estabilização lateral e longitudinal e controlo” sendo constituída pelos mecanismos que atuam em situações críticas, como os sistemas a seguir descritos. O sistema de ABS possui especial importância no desenvolvimento deste trabalho e por isso, será descrito mais detalhadamente.

3.5.1. Sistemas de segurança ativa

▪ Sistema anti-bloqueio de travagem (ABS)

Na área dos sistemas de segurança ativa, o ABS é talvez o mais importante, uma vez que é usado por muitos outros sistemas de segurança ativa. O objetivo do sistema de ABS é duplo. Por um lado, evita o bloqueio das rodas, a fim de preservar a capacidade do pneu para produzir uma força lateral garantido a manobrabilidade do veículo. Por outro lado, o ABS tem como objetivo manter a força de travagem próxima do máximo, diminuindo a distância de travagem (Hoàng, 2014).

O princípio físico de base a partir do qual o ABS foi desenvolvido é de que o atrito estático é sempre maior do que o atrito cinético, sendo o atrito estático traduzido pela aderência da roda ao piso (descrito em 3.1), e o cinético o que existe quando as superfícies em contacto têm, entre elas, um movimento relativo designado por derrapagem (IMTT, 2010a).

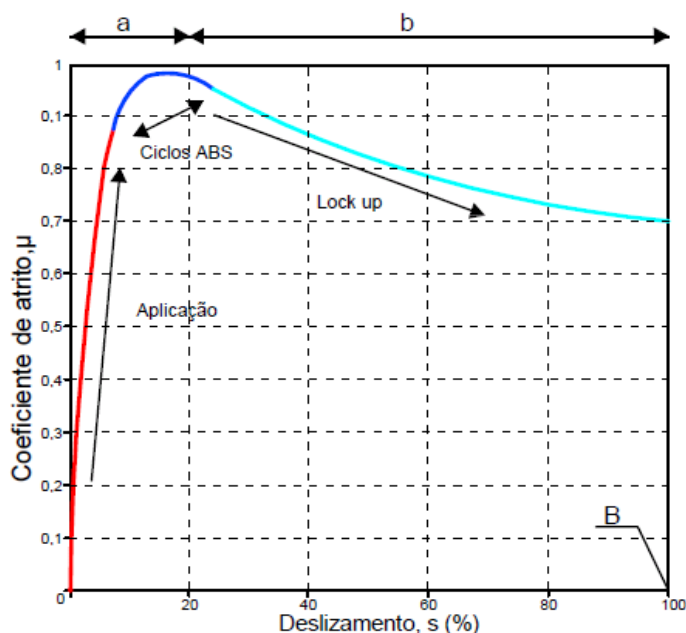


Figura 3.12. Processo do ciclo do ABS (Hamersma & Els, 2014; Kawaguchi, 2005).

Quando os travões do veículo são inicialmente aplicados (zona a da Figura 3.12) desenvolve-se um deslizamento longitudinal mínimo, obtendo-se o máximo desempenho dos travões na zona de ativação do ABS. Na área instável, b da Figura 3.12, ocorre um aumento do deslizamento resultante da queda do desempenho da travagem (diminuição do coeficiente de atrito) e um descontrolo direcional devido ao bloqueio da roda no ponto B. O Sistema ABS deteta quando o travamento da roda ocorre ou está prestes a ocorrer e reduz a pressão hidráulica em conformidade, possibilitando o desenvolvimento de forças de tração entre o pneu e a estrada que garante o controlo direcional e a paragem em curtas distâncias (Hamersma & Els, 2014; Kawaguchi, 2005).

A Figura 3.13 ilustra a constituição deste sistema que se baseia num conjunto de sensores de movimento junto às rodas e têm como função informar constantemente a unidade eletrónica de controlo (UEC) acerca do número de rotações de cada uma das rodas, a partir desse valor calcula a velocidade de rotação das mesmas e converte-a em termos de velocidade do veículo. Os microprocessadores da UEC do ABS determinam o deslizamento longitudinal de cada roda, tendo em conta os valores de velocidade de rotação instantânea e a velocidade de referência (CEPRA, 2000b). Alguns dos avançados sistemas ABS incluem acelerómetros para determinar a desaceleração do veículo (Aly, 2011).

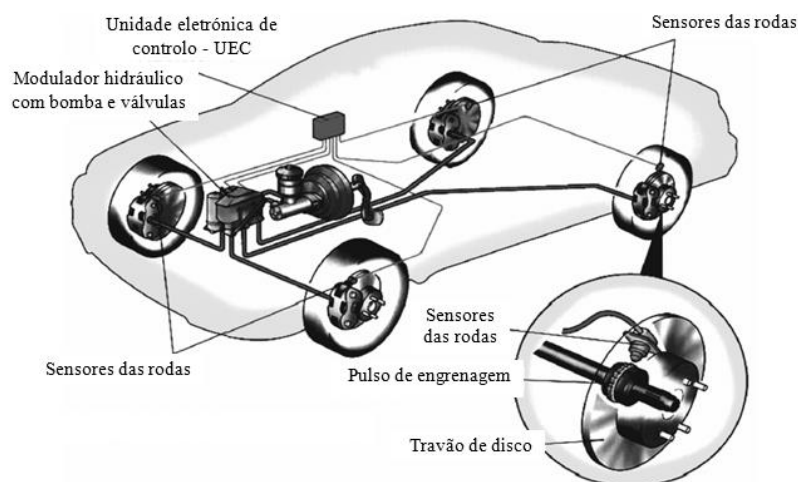


Figura 3.13. Distribuição dos componentes de um sistema ABS num automóvel (Aly *et al.*, 2011)

O ABS entra em funcionamento quando a diferença de velocidade de rotação da roda, entre dois instantes consecutivos, é superior a um determinado valor pré-estabelecido e

memorizado na UEC. Nesta situação as válvulas de controlo de pressão são ativadas, regulando a pressão de travagem de modo a evitar o bloqueio da roda (CEPRA, 2000b). O ABS pode libertar a força de travagem em cada roda várias vezes por segundo, até a velocidade do veículo reduzir e estar abaixo de um valor pré-definido (Figura 3.12) (IMTT, 2010a).

De forma resumida, o sensor da roda fornece a velocidade angular da roda para a unidade eletrónica de controlo (UEC), que com base em algumas abordagens de controlo subjacente fornece um sinal de saída para a unidade de controlo de comando de travão, este atua na travagem com base nos dados de saída da unidade eletrónica de controlo. A lógica do controlo é baseada na manutenção das rodas desbloqueadas para garantir a tração entre o pneu e a superfície da estrada no valor máximo ideal de coeficiente de atrito. A tarefa de manter as rodas que operam na tração máxima é complicada dado que a curva de atrito *versus* deslizamento varia com o tipo de pavimento, pneus e veículos. O diagrama de blocos na Figura 3.14 mostra a representação de conjuntos de um sistema de travagem anti-bloqueio ilustrando a funcionalidade básica dos vários componentes de um sistema de ABS e também aponta o fluxo dos dados/informações.

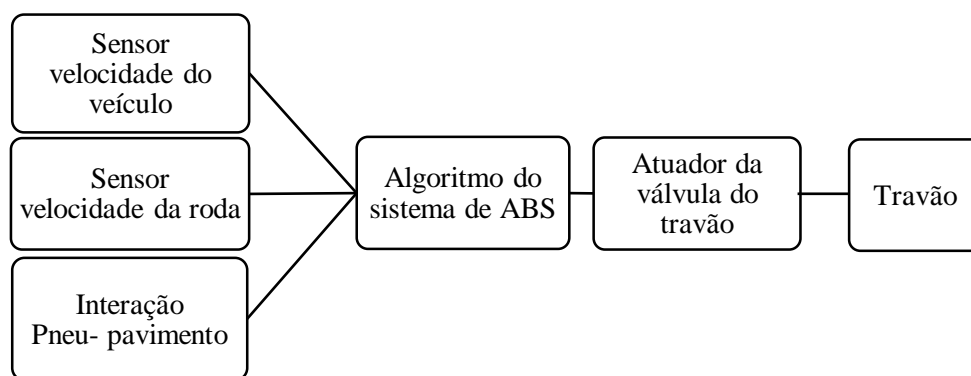


Figura 3.14. Representação de blocos do ABS (Aly *et al.*, 2011)

Desde a introdução do ABS, em 1978 pela *Bosch*, muitos algoritmos têm sido propostos na literatura. Pode-se dividir esses algoritmos de controlo em dois tipos: os baseados numa lógica de regulação com os limites de aceleração de roda, que são usados pela maioria dos ABS comerciais, e aqueles que se baseiam no controlo de deslizamento da roda que são preferidos pela maioria dos académicos. No ponto médio entre estes dois tipos de algoritmos encontra-se o conceito de rigidez estendida de travagem (XBS), uma classe

completamente diferente de estratégia de controlo de ABS. Este conceito combina as vantagens de ambas as abordagens (Hoàng, 2014).

A maioria dos algoritmos propostos na literatura científica para o ABS é baseada no deslizamento da roda (Unsal & Kachroo, 1999; Johansen, Petersen, Kalkkuhl & Ludemann, 2003; Savaresi, Tanelli & Cantoni, 2007; Choi, 2008; Pasillas-Lépine, 2012, *cit. in* Hoàng 2014). Estes são muitas vezes fundamentados em expressões matemáticas e funcionam mesmo quando não há um ponto máximo definido de deslizamento das rodas para que a força de travagem seja máxima. No entanto, estas abordagens são confrontadas com alguns inconvenientes. Em primeiro lugar, nem sempre é fácil estimar o deslizamento da roda de modo preciso. Em segundo lugar, o valor do deslizamento ótimo da roda é, em geral, desconhecido e não é fácil de calcular, em tempo real.

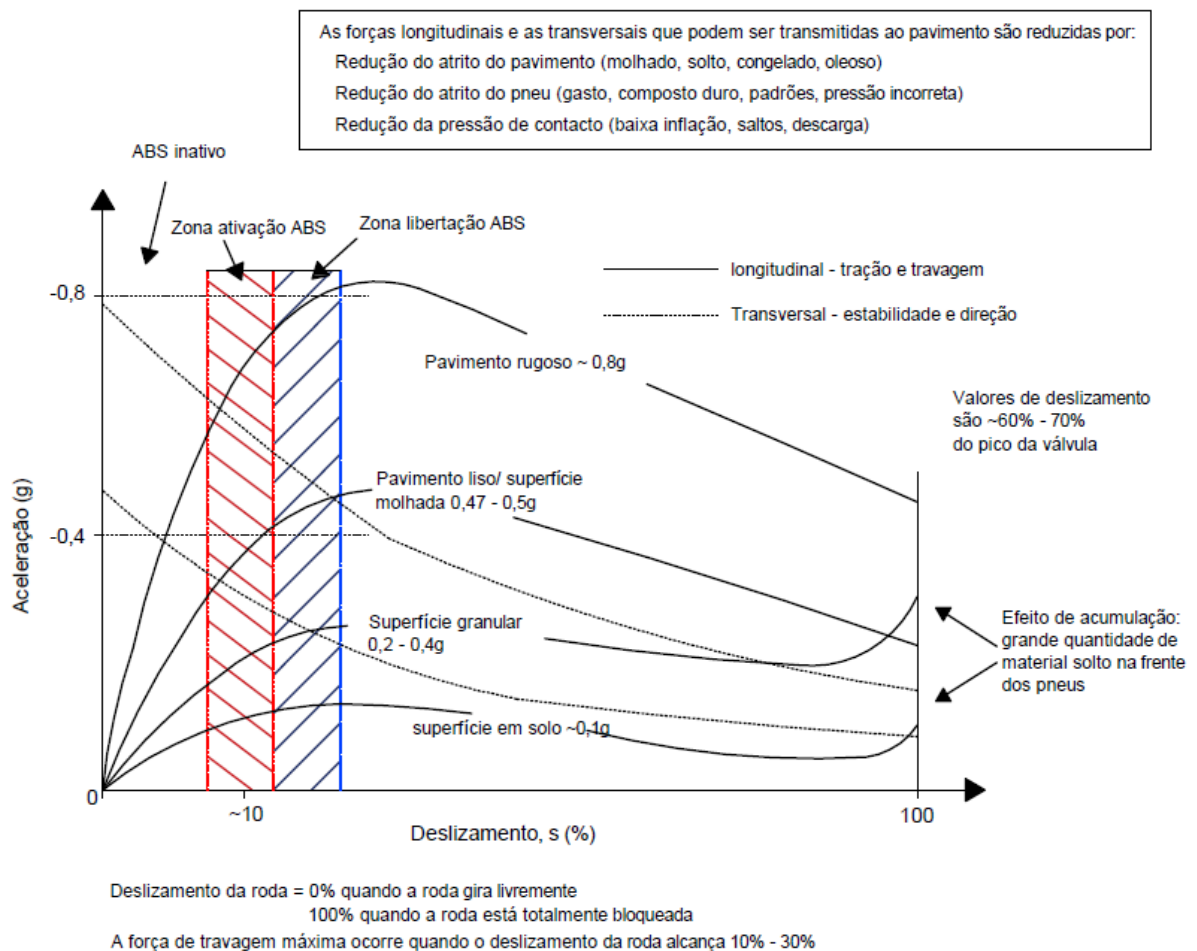


Figura 3.15. Relação entre o coeficiente de atrito e deslizamento da roda no funcionamento do ABS (adaptado de Aly *et al.*, 2011)

A Figura 3.15 mostra a relação entre o deslizamento da roda e o coeficiente de atrito em diferentes pavimentos. Mais uma vez, é visível que a força de travagem é máxima quando o deslizamento da roda é entre 10 a 30%. Também é possível visualizar o aumento do coeficiente de atrito com a acumulação de material solto na frente do pneu (Aly *et al.*, 2011).

Por último, salienta-se que o ABS nem sempre evita os acidentes porque a sua capacidade de imobilização do veículo está limitada fisicamente, ao coeficiente de atrito disponível e à resistência dos travões ao sobreaquecimento e, para além disso, se o veículo que segue atrás não possuir o sistema e/ ou não mantiver a devida distância de segurança poderá ocorrer igualmente uma colisão (IMTT, 2010a).

- **Nova abordagem para o sistema anti-bloqueio de travagem (ABS modificado)**

Não se trata propriamente de um sistema já implementado em veículos correntes, mas esta abordagem consiste no conhecimento em tempo real das informações relativas ao atrito do pavimento fundamentais nos sistemas de segurança ativa. Se essas informações fossem dadas em tempo real, as estratégias de controlo dos veículos seriam modificadas de acordo com esses valores contribuindo para uma maior eficiência do sistema de travagem e para um progresso na segurança rodoviária.

Esta abordagem surge da necessidade de melhorar a qualidade do controlo dos sistemas de travagem, pois a ECU (unidade eletrónica de controlo) do ABS desconhece a proporção ideal de deslizamento (alvo de controlo) e o coeficiente máximo de atrito da estrada no início da travagem e, portanto Wang, Guan, Lu e Zhang (2014) desenvolveram uma abordagem de reconhecimento da superfície da estrada (tipo de estrada, coeficiente de atrito máximo e o deslizamento ideal) com base no “valor característico da estrada”. A partir da integração das curvas do modelo de Burckhardt (modelo de interação pneu-pavimento adotado em muitos sistemas de ABS e apresentado em 4.3) e partindo de uma razão de deslizamento pré-definida de 17% aplicaram a equação 3.3 determinando o índice de caracterização dos diferentes tipos de pavimento designado "valor característico da estrada".

$$\tau = \int_0^{s_0} \mu ds \quad (3.3)$$

Onde:

τ – valor característico da estrada;

s – razão de deslizamento longitudinal;

μ – coeficiente de atrito da estrada;

s_0 – limite superior de integração (alvo de controlo inicial do controlador de ABS).

Para calcular o “valor característico da estrada”, são necessários o valor de s e μ . A relação de deslizamento dos pneus durante a travagem é estimada pela equação 3.1, onde a velocidade do veículo, pode ser medida por meio de sensores mas acrescentando custos extras. De modo a evitar tais custos existem métodos de estimativa da velocidade que apenas usam as informações da velocidade de rotação da roda, disponível nos sensores dos sistemas de ABS e a velocidade angular da roda que pode também ser determinada a partir dos mesmos.

Este modelo de Wang *et al.* (2014) apenas considera a força de atrito longitudinal, assim o coeficiente de atrito da estrada, μ , é definido como a razão da força longitudinal normalizada do pneu, F_x , pela força normal, F_z (Figura 2.4).

Com este sistema, quando um motorista pisa o pedal do travão, o veículo começa a travar, em tempo real é estimado o coeficiente de atrito (μ) de cada roda e calculado o incremento da razão de deslizamento (Δs_t) (a diferença entre a taxa de deslizamento atual e a relação de deslizamento do último instante). Ao mesmo tempo, τ é obtido a partir do μ estimado multiplicado por Δs_t em tempo real e acumulado constantemente. Com o aumento da força de travagem, μ , s e τ aumentam em conformidade. Quando $s=0,17$ designando-se por s_0 , $\tau = \tau_m$, e ECU determina o intervalo característico da estrada, deste modo, a superfície de estrada é identificada.

Wang *et al.* (2014) defendem que quando s atinge s_0 , τ atinge o seu valor máximo (τ_m), ou seja, τ_m é a área fechada sob o segmento de curva μ - s antes de uma proporção de deslizamento fixo, como mostrado na Figura 3.16.

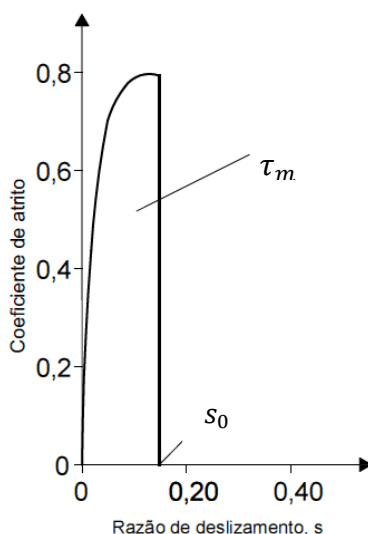


Figura 3.16. Curva de superfície de estrada tipo (Wang *et al.*, 2014)

O valor pré-definido de deslizamento ($s_0=0,17$) pode não ser o valor mais adequado de razão ideal de deslizamento da superfície da estrada, no entanto, segundo o modelo referido os pavimentos onde mais vulgarmente os veículos circulam, o betão betuminoso seco e os paralelos secos, apresentam um valor máximo de coeficiente de atrito próximo do 17% de deslizamento. Se o s_0 escolhido é muito baixo, torna-se incapaz de diferenciar as várias condições da estrada, por isso, assume-se um valor moderado ($s_0=0,17$) no controlador para identificar em pouco tempo (quando s atinge s_0) a estrada atual.

Tabela 3.2. Intervalos característicos do tipo de estrada (Wang *et al.*, 2014)

Tipo de pavimento	Número	τ_m^*	$\mu_{\text{máx}}$	S_{op}	Intervalo de valor característico do pavimento
Gelo	1	0,00832	0,05	0,031	[0; 0,00832]
Neve	2	0,03654	0,19	0,06	[0,00832; 0,03654]
Paralelos molhados	3	0,05444	0,38	0,14	[0,03654; 0,05444]
Paralelos secos	4	0,08193	1	0,4	[0,05444; 0,08193]
BB molhado	5	0,11537	0,8	0,131	[0,08193; 0,11537]
BB seco	6	0,13578	1,17	0,17	[0,11537; 0,13578]

Deste modo, o deslizamento alvo do controlador ABS é modificado para a razão de deslizamento ideal da estrada identificada em tempo real (Tabela 3.2), em vez do valor assumido inicialmente de razão de deslizamento (s_0), assim ele pode utilizar a condição de atrito máximo de superfície da estrada em questão.

A abordagem de identificação da superfície da estrada apresentada como sistema ativo de segurança pode efetivamente identificar as condições da superfície, incluindo o tipo de estrada, o coeficiente de atrito máximo e a razão de deslizamento ideal durante a fase inicial de travagem de acordo com o método do valor característico.

Para além do sistema ABS existem ainda outros sistemas de travagem assistida nomeadamente, o sistema de assistência à travagem (BAS), o sistema anticolisão de bordo (ACAS), a aplicação eletrónica de distribuição da força de travagem (EBD), o sistema de controlo de cruzeiro adaptativo (ACC) e o sistema de travagem elétrico (EBS).

O BAS consiste num aumento da pressão da travagem quando deteta que o condutor efetua uma travagem de emergência, medindo a velocidade com que é aplicado o pedal de travão (IMTT, 2010a). Um sensor monitoriza permanentemente a velocidade com que o pedal do travão é acionado e transmite esses dados para a unidade de controlo eletrónica. Sempre que for registada uma velocidade elevada pouco habitual do pedal, o sistema interpreta isto como uma travagem de emergência⁸.

O sistema anticolisão de bordo (ACAS: *Airborne Collision Avoidance System*) utiliza uma variedade de sensores que detetam obstruções inevitáveis do veículo em movimento. O sistema pode emitir um aviso ao condutor ou adotar uma ação de correção. Este sistema requer sensores que já são usados por sistemas de controlo de cruzeiro adaptativo. Quando recebe dados de sensores voltados para a frente o sistema anticolisão executa cálculos para determinar se há potenciais obstruções presentes. Se o diferencial de velocidades entre o veículo e qualquer objeto à frente do mesmo for demasiado grande, o sistema anticolisão realiza determinadas operações. Em alguns sistemas o condutor é avisado da aproximação do obstáculo e noutros mais avançados o próprio sistema ativa o sistema de travagem, de modo que no momento em que o condutor aciona o pedal do travão, este já tenha uma quantidade substancial de potência de travagem. Este sistema⁹ foi implementado como uma tecnologia com elevado potencial para salvar vidas e a comissão europeia em 2011 instituiu que a partir de 2013 todos os veículos comerciais novos deveriam ser equipados com estes sistemas de travagem automática. Em relação aos veículos de passageiros os

⁸ <http://www.mercedesbenz.pt/content/portugal>, consultado a 28-10-2014

⁹ <http://cartech.about.com/od/Safety/a/Collision-Avoidance.htm>, consultado a 29-01-2015

fabricantes têm até ao final de 2015 para incorporarem o sistema. Alguns sistemas anti-colisão também têm a capacidade de tomar medidas corretivas diretas como o acionamento de outros sistemas como ABS e ESP.

A aplicação eletrónica de distribuição da força de travagem (EBD) permite o controlo individual da força de travagem em cada roda, de forma independente, de acordo com a aderência disponível em cada uma das rodas (IMTT, 2010a). Este sistema monitoriza constantemente as condições de condução, de travagem e de distribuição de peso. Juntamente com o ABS, o EBD usa sensores que determinam quais as rodas a aplicar a força de travagem máxima.¹⁰ Também o sistema de controlo de cruzeiro adaptativo (ACC) auxilia o condutor a manter um intervalo temporal constante em relação ao veículo da frente e avisa-o sempre que a essa distância diminuir repentinamente. O sistema realiza funções de travagem e aceleração dependendo da situação de tráfego cumprindo sempre as distâncias de segurança previamente estabelecidas.¹¹

Por último, no que diz respeito aos sistema de travagem assistida, o sistema de travagem elétrico (EBS) tem como objetivo melhorar o controlo do veículo, a reação e a estabilidade durante a travagem ativando o travão de uma forma elétrica e, deste modo, permitir uma atuação mais rápida dos travões (IMTT, 2010a).

Nos sistemas de segurança ativa estão também integrados os sistemas de controlo de estabilidade (ESC/ESP - *Electronic Stability Programme*) que têm como princípio de funcionamento os sensores utilizados no sistema de ABS e de ASR. Quando são detetadas discrepâncias na dinâmica do veículo com base nas medições das acelerações angulares e da posição do volante, o sistema atua em cada roda, travando-a estrategicamente, de forma a induzir ou anular a guinada, provocando a rotação (em caso de subviragem) ou recuperando estabilidade rotacional (em caso de sobreviragem) (Figura 3.18) (IMTT, 2010a).

¹⁰ <http://www.toyota.com.au/hilux/features/safety/electronic-brake-force-distribution-ebd>, consultado a 29-01-2015.

¹¹ <http://www.scania.pt/camioes/principais-componentes/chassis/sistemas-de-seguranca/acc/>, consultado a 30-01-2015

A Euro NCAP¹² (*European New Car Assessment Programme*) entre 2011 e 2013 realizou testes de funcionalidade adicional com base em manobras reais de mudança de faixa em todos os carros equipados com ESC a uma velocidade de 80 km/h. O deslocamento para o lado, a estabilidade e a capacidade do veículo para seguir um caminho em linha reta foram avaliados (Figura 3.17). Em 2014, a montagem de sistemas ESC tornou-se obrigatório para todos os veículos novos e, portanto, Euro NCAP parou de testar o sistema.¹³

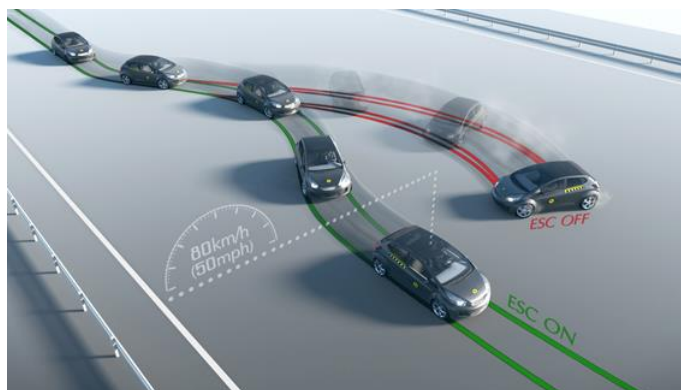


Figura 3.17. Esquema do teste de avaliação do ESC⁸.

Por fim, os sistemas de controlo de tração (ASR) limitam estrategicamente a derrapagem consoante a intensidade com que é detetada nas rodas em virtude do binário transmitido pelo motor. Segundo IMTT (2010a), este sistema é particularmente eficiente em piso de coeficiente de atrito baixo, em piso contaminado (água, óleo ou gelo), tanto em reta como em curva, pois permite até subir rampas impossíveis de transpor sem sistema de controlo de tração. Em curva e em veículos de tração dianteira o sistema elimina a subviragem (Figura 3.18 a)) por excesso de aceleração e elimina a sobreviragem (Figura 3.18 b)) por excesso de aceleração em veículos de tração traseira.

¹² Euro NCAP é um programa de segurança automóvel fundado em 1997, pelo *Transport Research Laboratory* que avalia a segurança dos veículos através de uma série de testes

¹³ <http://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/safety-assist/esc/>, consultado a 28-01-2015

⁸ <http://www.mercedesbenz.pt/content/portugal>, consultado a 28-10-2014

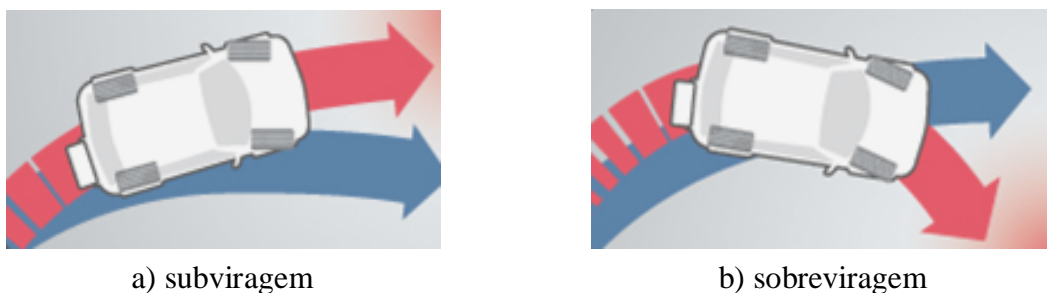


Figura 3.18. Representação dos fenômenos de sobreviragem e subviragem¹⁴

3.6. Caracterização física do fenômeno de paragem

A investigação dos acidentes de trânsito, realizada por profissionais, utiliza abundantemente os princípios da mecânica com o objetivo de apurar as causas dos acidentes. Existem, atualmente, diversas ferramentas computacionais específicas que recriam as condições e as características dos veículos originais, um deles é o programa comercial *Acras* (Kleer, Thielo & Santos, 1997). A reconstituição do acidente inicia-se com a construção do cenário aproximado onde ocorreu o acidente incluindo a via, obstáculos, passeios, marcações horizontais entre outros (Pinto, 2008).

3.6.1. Distância de paragem

A distância de paragem ou a distância de visibilidade de paragem (DP) é a distância mínima necessária para que um veículo possa parar antes de atingir um determinado obstáculo inesperado e é tida em consideração na velocidade de projeto (equação 3.4).

A distância de paragem é dada pela soma da distância percorrida pelo veículo durante o tempo de percepção-reação do condutor, d_1 , e a distância percorrida durante o tempo de travagem, d_2 .

$$DP = d_1 + d_2 \quad (3.4)$$

O “tempo de reação” é o tempo que decorre até o condutor carregar no pedal do travão depois de ter tomado consciência da existência do obstáculo e o “tempo de percepção” é o que decorre entre a visualização do obstáculo e a tomada de consciência que deve acionar os travões.

¹⁴ <http://www.bfgoodrich.pt/pt/conselhos/Guia-de-conducao/Algumas-definicoes>, consultado a 28-01-2015

A distância percorrida durante o tempo de percepção – reação é dada por:

$$d_1 = V \times t \quad (3.5)$$

Sendo:

d_1 [m] – distância de percorrida pelo veículo durante o tempo de percepção - reação;

V [m/s] – velocidade do veículo;

t [s] – tempo de percepção – reação.

3.6.2. Distância de travagem

A distância de travagem é a distância necessária para que o trabalho das forças de atrito anule a energia cinética de que o veículo está sujeito no início da travagem.

No início da travagem, o veículo tem uma velocidade V (m/s) e, portanto está animado de uma energia cinética igual a:

$$E_c = \frac{mV^2}{2} \quad (3.6)$$

No fim da travagem a energia cinética é nula, tendo sido anulada pelo trabalho, W , da força de atrito, F_a , ao longo do percurso de travagem, d_2 . Admitindo-se que a força é paralela ao deslocamento e o trabalho de força de atrito, W_{F_a} , será dado pela equação 3.7.

$$W_{F_a} = F_a \times d_2 = \mu \times P \times d_2 = \mu \times m \times g \times d_2 \quad (3.7)$$

Em que:

P [N] – peso do veículo;

μ – coeficiente de atrito longitudinal entre o pneu e o pavimento;

m [Kg] – massa do veículo;

g [m/s²] – aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

Então, no final da travagem temos:

$$W_{Fa} = \frac{mV^2}{2} \quad (3.8)$$

Deste modo, a distância de travagem, d_2 , é dada por:

$$d_2 = \frac{mV^2}{2\mu mg} = \frac{V^2}{2\mu g} \quad (3.9)$$

Na situação de travagem em pavimento inclinado, a distância de visibilidade de paragem pode ser determinada pela equação 3.10 (INIR, 2010).

$$DP = \frac{Vt}{3,6} + \frac{V^2}{254(\mu_p \pm G)} \quad (3.10)$$

Onde:

DP [km] – distância de paragem;

V [km/h] – velocidade do tráfego;

t [s] – tempo de reação do condutor;

μ_p – coeficiente de atrito longitudinal de projeto;

G [%] – inclinação longitudinal da estrada.

3.6.3. Distância de paragem e coeficiente de atrito

O coeficiente de atrito adotado para determinado pavimento influencia severamente os valores de distâncias de paragem obtidos, facto evidente na Tabela 3.34 que apresenta as distâncias de travagem para os diferentes valores de coeficiente de atrito da Tabela 3.3. Esta inclui os valores de atrito para pavimentos em betão betuminoso molhado, de acordo com a AASHTO (1994, 2001) e valores de atrito em função da textura, macrotextura e microtextura, (rugosa e aberta, rugosa e fechada, polida e aberta e polida e fechada) apresentado por Guzmán (1995, *cit. in* Aps 2006).

Tabela 3.3. Valores de atrito de acordo com a AASHTO (1994, 2001) e Guzmán (1995)

Velocidade (km/h)	AASHTO	Guzmán (1995)			
		Rugosa e aberta	Rugosa e fechada	Polida e aberta	Polida e fechada
50	0,36	0,7	0,6	0,3	0,25
60	0,34	0,62	0,56	0,25	0,2
70	0,32	0,6	0,49	0,22	0,18
80	0,31	0,58	0,4	0,2	0,17
90	0,31	0,57	0,35	0,2	0,16
100	0,3	0,55	0,3	0,19	0,16
110	0,3	0,55	0,24	0,18	0,15
120	0,29	0,55	0,22	0,17	0,15

Tabela 3.4. Cálculo da distância de travagem para os valores de atrito da Tabela 3.3 (Aps, 2006).

Velocidade (km/h)	Distância de travagem (m)				
	AASHTO	Guzmán (1995)			
		Áspera e aberta	Áspera e fechada	Polida e aberta	Polida e fechada
50	27,23	14,01	16,34	32,68	39,22
60	41,52	22,77	25,21	56,47	70,59
70	60,05	32,03	39,22	87,34	106,75
80	80,96	43,27	62,75	125,49	147,64
90	102,47	55,73	90,76	158,82	198,53
100	130,72	71,30	130,72	206,40	245,10
110	158,17	86,27	197,71	263,62	316,34
120	194,73	102,67	256,58	332,18	376,47

Em Portugal, é aplicada a Norma de Traçado (INIR, 2010) que inclui princípios básicos, métodos e valores limite e de referência para o projeto de estradas da Rede Rodoviária Nacional (RRN). Tem como principal objetivo a elaboração de projetos segundo bases constantes e de acordo com os princípios e boa prática da Engenharia Rodoviária.

Segundo INIR (2010), o tempo de percepção – reação adotado é de 2 segundos. Também o coeficiente de atrito longitudinal, μ_p , adotado na expressão 3.10, é em função da velocidade, natureza e estado dos pavimentos, do desenho do piso dos pneus e da presença de água no pavimento. Nas normas de projeto anteriores (JAE, 1994) admite-se que o pavimento para a adoção do coeficiente de atrito é executado em betão betuminoso, razoavelmente conservado, húmido, limpo e que os pneus estão bastante gastos, considerando-se também que o atrito transversal não tem qualquer influência na distância de travagem devido aos elevados raios das curvas que são admitidos (JAE, 1994). Na

Tabela 3.5 apresentam-se as distâncias de visibilidade de paragem (DP) que devem ser garantidas no projeto geométrico, assim como os coeficientes de atrito a considerar dependentes da velocidade de tráfego assumida em projeto.

Tabela 3.5. Distâncias de visibilidade mínimas paragem e coeficientes de atrito longitudinal (JAE, 1994; INIR, 2010)

Velocidade (km/h)	DP (m) mínima	DT (m) mínima	μ_P (JAE, 1994)	μ_P (INIR, 2010)
40	40	39,98	0,38	
50	60	59,97	0,36	0,32
60	80	79,97	0,35	0,32
70	100	99,96	0,34	0,32
80	120	119,96	0,33	0,32
90	150	149,95	-	0,32
100	180	179,94	0,32	0,32
110	220	219,94	0,32	0,31
120	250	249,93	0,32	0,31
130	320	319,93	-	0,27
140	390	389,92	-	0,25

Capítulo 4

MODELOS DE INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO

4. Modelos de interação pneu-pavimento

Existem vários modelos que têm sido desenvolvidos para descrever o fenómeno de interação pneu-pavimento. Os primeiros modelos foram desenvolvidos a partir de 1930 pelo laboratório de investigação de transportes do Reino Unido. Estes modelos foram desenvolvidos e fundamentados em dispositivos de ensaio, como por exemplo o SCRIM.

Em meados de 1970, foi desenvolvido, nos EUA, o modelo de Penn State, melhorado mais tarde pelo modelo Rado na década de 1990 (Henry, 2000). Também a Associação Mundial de Estrada (PIARC) desenvolveu o modelo PIARC, que utiliza a forma geral do Modelo Penn State para harmonizar medições de atrito de diferentes dispositivos através da utilização de um Índice Atrito Internacional – IFI, já apresentado no subcapítulo 0 (Wambold *et al*, 1995, *cit. in* Wilson 2006). Estes e outros modelos desenvolvidos ao longo dos anos serão descritos neste capítulo.

4.1. Modelo Penn State

O modelo Penn State (Leu & Henry, 1983, *cit. in* Wilson 2006) descreve o coeficiente de atrito (μ) em função da velocidade de deslizamento (S) através de uma função exponencial (equação 4.1).

$$\mu = \mu_0 e^{\frac{-PNG}{100}S} \quad (4.1)$$

Onde:

μ – coeficiente de atrito;

μ_0 – coeficiente de atrito quando a velocidade é nula;

S [km/h] – velocidade de deslizamento;

PNG [%] – percentagem do gradiente normalizado de μ

Leu e Henry (1983, *cit. in* Wilson 2006) demonstram que PNG é constante com a velocidade e altamente correlacionada com a profundidade de textura (macrotextura) e que μ_0 pode ser previsto a partir da microtextura. Versões posteriores do modelo de Penn State substituíram o termo $[PNG / 100]$ por uma constante de velocidade, S_p (equação 4.2).

$$\mu = \mu_0 e^{\frac{S}{S_p}} \quad (4.2)$$

Onde:

μ – coeficiente de atrito;

μ_0 – coeficiente de atrito quando a velocidade é nula (relacionado com microtextura);

S [km/h] – velocidade de deslizamento;

S_p [km/h] – constante da velocidade de referência relacionada com a macrotextura, (ver equação 2.4).

A Figura 4.1 mostra o modelo da Penn State para dois tipos de pavimentos que têm o mesmo nível de atrito para uma velocidade de deslizamento de 60 km/h, mas comportam-se de forma muito diferente devido às diferenças na textura, resultando em valores diferentes para S_p . O exemplo do valor de atrito para uma velocidade de deslizamento de 60 km/h, demonstra a necessidade de especificar mais do que um único valor para descrever a resistência à derrapagem de um pavimento (Henry, 2000).

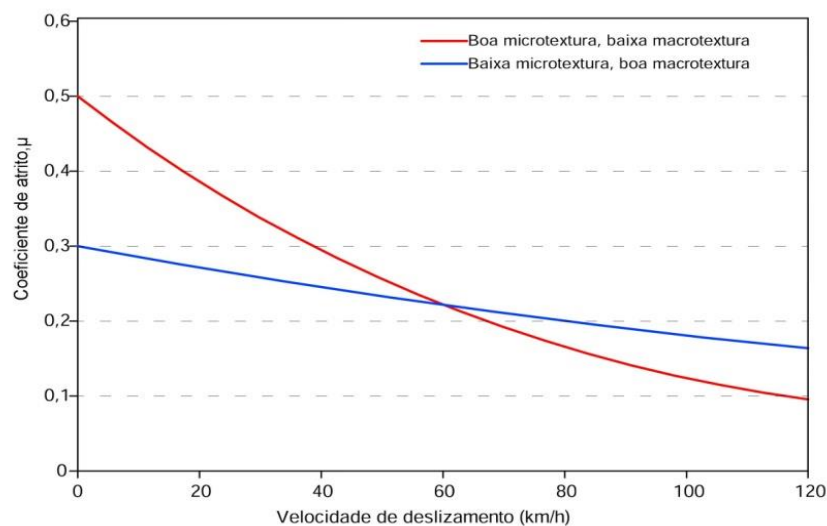


Figura 4.1. Modelo Penn State de duas superfícies com texturas diferentes (adaptado de Henry, 2000)

4.2. Modelo Rado

Segundo o modelo de Rado, o atrito varia ao longo do processo de travagem, logo depende da velocidade de deslizamento do veículo. Henry (2000) defende que o atrito aumenta de zero até a um valor de pico estando a roda em rolamento livre, ou seja, com velocidade

angular, ω_L , diferente de zero e depois diminui com a roda travada provocando o bloqueio de roda onde a velocidade angular, assume o valor de zero.

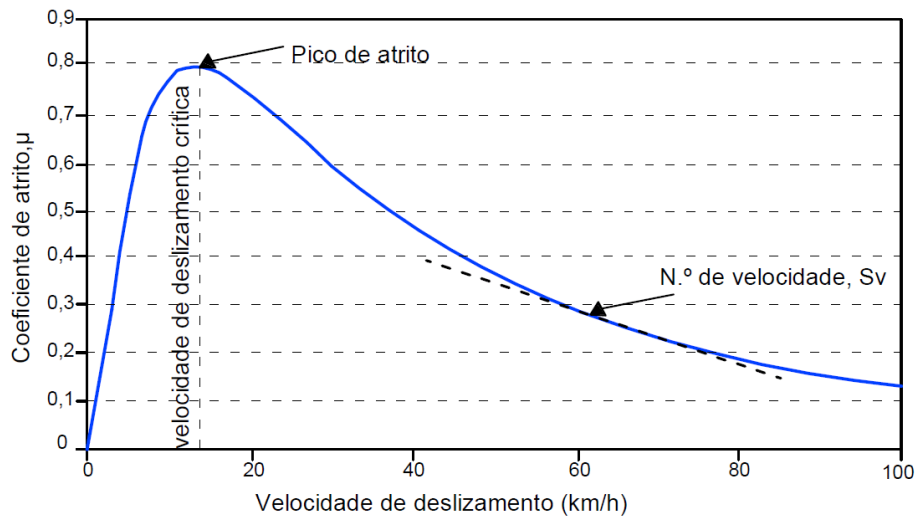


Figura 4.2. Relação da velocidade de deslizamento e o coeficiente de atrito da superfície da estrada (adaptado de Henry, 2000)

Na Figura 4.2, a parte ascendente da curva depende das propriedades do pneu, já os valores após o pico dependem das propriedades da textura da superfície do pavimento (macrotextura).

Rado (1994, *cit. in* Wilson 2006) modelou o comportamento da curva representada na Figura 4.2 a partir de equação 4.3. A fórmula complementa o modelo de atrito PIARC apresentado no subcapítulo 0, pois incorpora o aumento do coeficiente de atrito até ao valor máximo (μ_{pico}).

$$\mu(s) = \mu_{pico} \times e^{-\left[\frac{\ln(s/s_{pico})}{C}\right]^2} \quad (4.3)$$

$\mu(s)$ – coeficiente de atrito superficial a uma dada velocidade de deslizamento (S);

μ_{pico} – coeficiente de atrito de pico;

S [km/h] – velocidade de deslizamento;

S_{pico} [km/h] – velocidade de deslizamento de pico;

C – fator de forma relacionado com a microtextura da superfície do pavimento.

O valor de C controla a forma descendente do gráfico. A Figura 4.3 ilustra o valor do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento e de quatro valores diferentes para o fator de forma, C . Quando o fator de forma é superior a 10, o lado direito da curva de atrito torna-se reto, o que significa que o coeficiente de atrito permanece quase constante ao longo da variação da velocidade de deslizamento. Quando C é inferior a um, a curva de atrito apresenta um pico (Al-Qadi *et al.*, 2002).

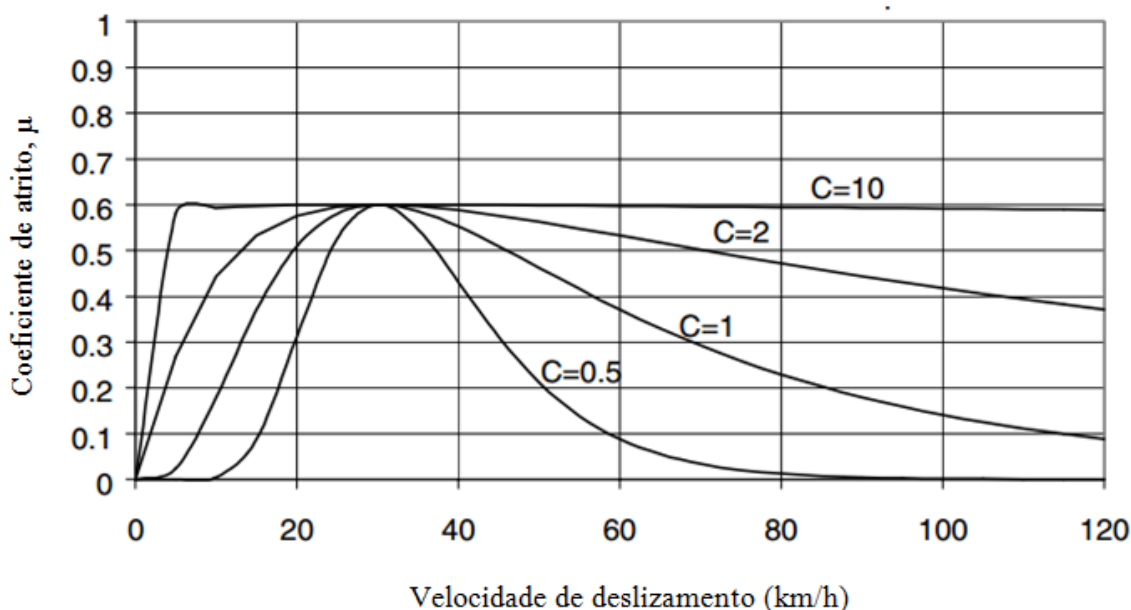


Figura 4.3. Modelo de atrito de Rado ($\mu_{pico}=0,6$ e $S_{m\acute{a}x}=30\text{km/h}$) (adaptado de Al-Qadi *et al.*, 2002)

Henry (2000) admite que uma característica importante do modelo de Rado e de Penn State é a sua relação com a travagem do veículo real em situações de emergência (ou seja, quando o motorista tenta travar as rodas). Quando o travão é aplicado pela primeira vez, o coeficiente de atrito segue o modelo de Rado (equação 4.3), até as rodas estarem totalmente bloqueadas, em seguida, o veículo que nesse momento possui uma velocidade igual à velocidade de deslizamento, experimenta uma diminuição de atrito entre o pavimento e pneu, seguindo o modelo de Penn State até o veículo parar. No caso do veículo possuir sistema anti-bloqueio de travagem (ABS), o atrito segue o modelo de Rado até um valor pré-definido de deslizamento ser atingido, de seguida o travão é libertado, o atrito diminui e as rodas tornam a girar até à nova aplicação de travão – novo ciclo de ABS. Para cada ciclo ocorre uma diminuição de velocidade do veículo (Wilson, 2006).

4.3. Modelo Burckhardt

O modelo de atrito de Burckhardt foi desenvolvido tendo como base resultados experimentais ajustados de um grande número de testes em diferentes tipos de pavimentos e é amplamente utilizado em estudos de dinâmica do veículo (Zhang *et al.*, 2013; Hoàng, 2014; Pinto, 2014; Wang *et al.* 2014; Dousti *et al.*, 2015). Este modelo utiliza funções lineares e exponenciais para simular a relação entre o coeficiente de atrito e o deslizamento dos pneus (equação 4.4). O modelo permite determinar o coeficiente de atrito a partir de parâmetros C_1 , C_2 e C_3 obtidos de curvas experimentais.

$$\mu = C_1(1 - e^{(-C_2s)}) - C_3s \quad (4.4)$$

Onde:

C_1 – valor máximo da curva de atrito;

C_2 – forma da curva de atrito;

C_3 – diferença entre o valor máximo de atrito da curva e o valor para $s=1$;

s – razão de deslizamento do pneu .

As sete diferentes curvas μ - s da Figura 4.4 correspondem a sete situações diferentes de ensaio, sendo as respectivas curvas obtidas com os parâmetros de C_1 , C_2 e C_3 definidos na Tabela 4.1. Uma das características deste modelo é a tendência linear descendente para valores de escorregamento maiores que o valor máximo de coeficiente de atrito, até ao limite de deslizamento ($s=1$), ou seja o bloqueio total das rodas.

O modelo de Burckhardt serve de base a alguns modelos lineares de travagem como os utilizados nos sistemas anti-bloqueio de travagem (ABS e ABS modificado).

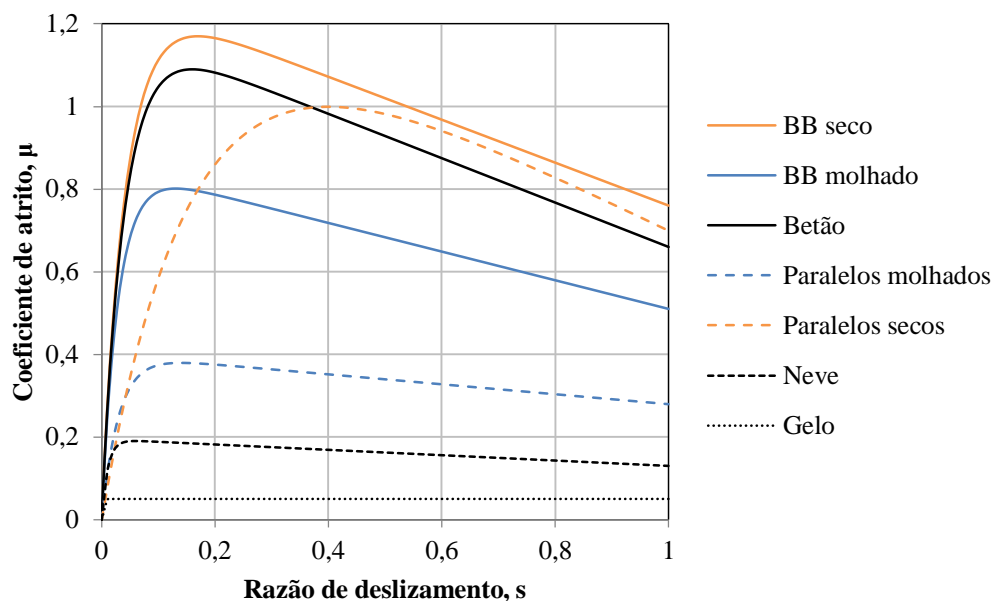


Figura 4.4. Curvas μ - s do modelo de Burckhardt

Tabela 4.1. Valores dos parâmetros das estradas tipos para aplicação do modelo de Burckhardt (Wang *et al.*, 2014)

Superfície da estrada	C_1	C_2	C_3
Betão betuminoso seco	1,2801	23,99	0,52
Betão betuminoso molhado	0,857	33,822	0,347
Paralelos secos	1,3713	6,4565	0,6691
Paralelos molhados	0,4004	33,708	0,1204
Neve	0,1946	94,129	0,0646
Gelo	0,05	306,39	0
Betão	1,1973	25,168	0,5373

O conhecimento do coeficiente de atrito é extremamente útil para o desenvolvimento dos sistemas de controlo de segurança ativa dos veículos como já descrito em 3.5.1, pois através desse conhecimento pode definir-se o valor ideal de deslizamento longitudinal em função do máximo do coeficiente de atrito de cada um dos tipos de pavimento (Dousti *et al.*, 2015).

O modelo de Burckhardt foi o adotado como base para o desenvolvimento do modelo de interação pneu-pavimento desenvolvido no presente trabalho pois, para além de ser o modelo mais adotado na formulação dos sistemas ABS, possui uma boa aproximação com a realidade e uma fácil aplicação.

4.4. Fórmula mágica

O modelo da fórmula mágica foi proposto por Pacejka e relaciona o coeficiente de atrito longitudinal, com a razão de deslizamento através da equação 4.5 (Pinto, 2014; Zhang *et al.*, 2014; Dousti *et al.*, 2015).

Tal como o modelo de Burckhardt, este modelo apenas considera a componente longitudinal do deslizamento, μ , desprezando o deslizamento lateral sendo esta a abordagem mais comum para os projetos de sistemas de ABS.

$$\mu = \mu_{xm} \sin\{C \tan^{-1}[Bs(1 - E) + E \tan^{-1}(Bs)]\} \quad (4.5)$$

Onde:

μ_{xm} – coeficiente de atrito longitudinal máximo;

C – coeficiente de forma da curva de coeficiente de atrito longitudinal (descreve a forma geral da curva);

B – coeficiente de rigidez da curva de coeficiente de atrito longitudinal (rege e inclinação da curva μ -s para baixos níveis de escorregamento);

E – coeficiente de curvatura da curva de coeficiente de atrito longitudinal (regula a curvatura do gráfico curva μ -s principalmente na área de atrito máximo).

Pacejka (2006) defendeu que os quatro fatores com um papel fundamental na modelação da interação pneu–pavimento são: a propriedade de adesão na interface entre as superfícies do pneu e do pavimento; a distribuição da pressão no contacto; a rigidez da borracha e a rigidez da estrutura. Com estes quatro fatores identificados e a partir da análise das forças longitudinais, laterais e verticais que atuam nos pneus, Pacejka elaborou a expressão anteriormente apresentada (equação 4.5) baseada num modelo empírico de um pneu que representa o comportamento dinâmico em várias condições de circulação. Os resultados obtidos mostraram a importância da contribuição do pneu em contacto com o pavimento, pois este determina todas as forças de reação que atuam na dinâmica do veículo (Pinto, 2014; Zhang *et al.*, 2014; Dousti *et al.*, 2015). Na Tabela 4.2 são apresentados alguns valores típicos para as constantes da equação 4.5 que dependem das condições e tipo de estradas, como já referido.

Segundo Zhang *et al.* (2014), os parâmetros podem ser identificados a partir dos dados do veículo-teste mas o processo é muito problemático, por isso defendem que não é um modelo adequado para projetar o sistema ABS.

Tabela 4.2. Parâmetros típicos para aplicação do modelo de fórmula mágica (Pinto, 2014)

Superfície da estrada	μ_{xm}	B	C	E
Betão betuminoso seco	1	10	1,9	0,97
Betão betuminoso molhado	0,82	12	2,3	1
Neve	0,3	5	2	1
Gelo	0,1	4	2	1

Na Figura 4.5 estão representadas as curvas μ -s do modelo de Pacejka e do modelo de Burckhardt para os diferentes tipos de pavimento. As formas das curvas da força de travagem exibem, para ambos os modelos, comportamentos semelhantes nas diferentes condições de estrada, expeto em paralelos secos que mostra um comportamento peculiar para o qual é proposto um conjunto de parâmetros da expressão de Burckhardt já apresentada anteriormente. Na figura também é indicado a razão ótima de deslizamento para o betão betuminoso seco expresso através da sigla s^* .

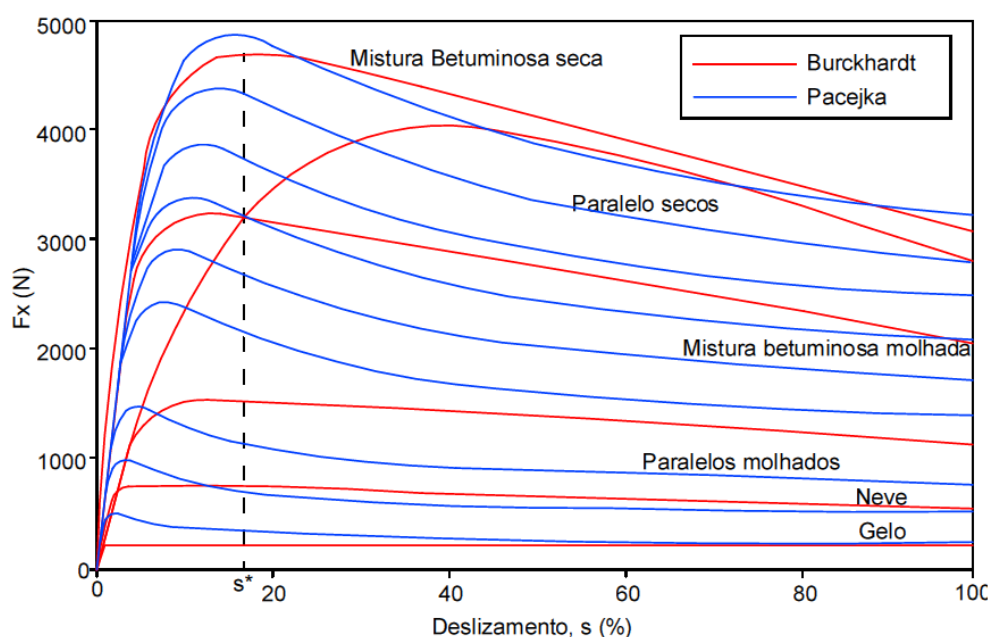


Figura 4.5. Modelo de Burckhardt e de Pacejka: Variação da força de travagem vs. deslizamento longitudinal (Dousti *et al.*, 2015)

Os modelos de interação pneu-pavimento revelam-se de extrema importância, pois a força de tração criada pelo motor do veículo na superfície de contacto depende da força normal

no ponto de contacto e do coeficiente de atrito entre o pneu e a estrada, que varia com a razão de deslizamento nos diferentes tipos de pavimento.

Os métodos enunciados anteriormente pressupõem a identificação prévia de cada tipo de pavimento, contudo é possível extrair dos modelos de interação pneu-pavimento informações que auxiliem na identificação do tipo de pavimento em presença. Normalmente existem duas abordagens para esta identificação “os métodos baseados em causas” e os “métodos baseados no efeito” (Wang *et al.*, 2014).

Os primeiros detetam os parâmetros que afetam o atrito das estradas através de sensores colocados nos veículos. Por exemplo, Erdogan, Alexander e Rajamani (2011) propõem o uso de um sensor piezelétrico que permite medir a deformação lateral do pneu a partir do interior e, deste modo estimar o coeficiente de atrito e ao mesmo tempo o ângulo de deslizamento, com bastante precisão. Porém, sempre que as condições da estrada se afastam das condições de ensaio, estes métodos perdem precisão. Além disso, necessitam da aplicação de sensores nos veículos para fornecerem as informações da interação pneu-pavimento, o que aumenta os custos envolvidos na produção dos veículos, para além de constituírem desafios técnicos adicionais.

Os “métodos baseados no efeito” identificam as condições de atrito da estrada através da resposta dos veículos gerada pelas diferentes condições do pavimento. Segundo Gustafsson (1997) as condições de atrito do pavimento podem ser estimadas, através de um algoritmo, com base na relação de deslizamento. Também, Liu e Peng (1996, *cit. in* Wang *et al.* 2014) propõem um método que aumenta a precisão de estimativa do coeficiente de atrito partindo dos métodos clássicos de expoente de Lyapunov e do método dos mínimos quadrados. Hahn, Rajamani e Alexander (2002) defendem que, em condições reais de condução, a relação de deslizamento longitudinal dos pneus é pequena e, portanto existem limitações no uso do deslizamento longitudinal para estimar o coeficiente de atrito, de modo a colmatar essa limitação propõem a utilização do GPS para calcular o ângulo de deslizamento lateral do pneu e, de seguida calculam o coeficiente de atrito através da dinâmica lateral do veículo. Umeno *et al.* (2002, *cit. in* Wang *et al.* 2014) desenvolvera um método tendo por base a frequência das características da velocidade de vibração da roda, que refletem as diferentes características de ressonância sob diferentes estradas. Este método é fácil de implementar pois usa apenas um sensor de velocidade da roda não

necessitando de sensores adicionais e fornece uma precisão adequada. Shim e Margolis (2010) expõem um método em que é assumido um coeficiente de atrito da estrada a partir do qual é calculada a resposta dinâmica do veículo modelo. A partir desta resposta corrige o valor pressuposto de coeficiente de atrito da estrada de acordo com as diferenças de resposta entre veículo real e do modelo do veículo. No entanto, é difícil escolher parâmetros de correção apropriados para adaptarem-se às condições de operação do veículo.

Com estas abordagens de identificação através das informações de atrito das estradas presencia-se um grande progresso. Geralmente há uma classificação (em padrão discreto) das condições da superfície da estrada, em segundo lugar é definido um índice que representa a condição caracterizadora da estrada e finalmente a condição da estrada é identificada de acordo com o reconhecimento do índice (Wang *et al.* 2014).

Estes métodos são a base do desenvolvimento dos sistemas de ABS, neste trabalho designados de ABS modificados. Estes sistemas muito promissores são contudo ainda sistemas conceptuais com muitas dificuldades de implementação em larga escala.

Capítulo 5

DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE INTERAÇÃO
PNEU-PAVIMENTO BASEADO EM PARÂMETROS REAIS DO
PAVIMENTO

5. Desenvolvimento de modelo de interação pneu-pavimento baseado em parâmetros reais do pavimento

Os pavimentos não têm uma aderência uniforme, ou seja, possuem uma capacidade de mobilização de forças de atrito entre o pneumático e a superfície do mesmo, distintas de pavimento para pavimento. Como se apresentou anteriormente, através de técnicas e equipamentos de observação do coeficiente de atrito, pode-se caracterizar a superfície dos diferentes pavimentos e, deste modo, identificar o valor de coeficiente de atrito a ter em consideração no cálculo da distância de travagem.

Este modelo pretende considerar os parâmetros tecnicamente obtidos, através dos diferentes ensaios, definidores das características de aderência (textura e atrito) nos modelos matemáticos de interação pneu-pavimento utilizados nos sistemas de segurança ativa (ABS) dos veículos.

Considerou-se para base da análise o modelo de Burckhardt. Este resulta de dados experimentais obtidos em pistas de ensaio e é considerado o mais credível em sistemas de ABS atualmente em uso, pois possui uma fórmula simples e apropriada à descrição da variação do coeficiente de atrito com a variação longitudinal de deslizamento, para a conceção do sistema de controlo do ABS do veículo.

5.1. Metodologia para obtenção dos parâmetros de Burckhardt através de características no pavimento

O modelo de Burckhardt é um dos principais modelos usados para representar a interação pneu-pavimento, no entanto apresenta a limitação de definir as constantes C_1 , C_2 e C_3 a partir de ensaios com veículos de teste, dos quais se obtêm tais valores, a Tabela 4.1 é disso exemplo. Com este estudo, pretende-se demonstrar que estes parâmetros podem ser determinados a partir dos ensaios de caracterização superficial, nomeadamente a Mancha de Areia e o *Grip-Test*.

O desenvolvimento das formulações para obtenção dos parâmetros citados anteriormente, tiveram como base inicial, apenas dados dos pavimentos betuminosos densos (BB) e drenantes (BBD) da bibliografia (Souza *et al.* (2005), Aps (2006), Santos (2007), Barros (2008), Silva (2008), Mattos *et al.* (2010), Mattos (2010), Pereira, (2010), Almeida (2011), Ascenso (2011), Couchinho (2011), Antunes *et al.* (2008) e Benta (2013)) que

foram organizados por tipologia de pavimento e analisados na tentativa de relacionar os tipos de camadas de desgaste em cada estudo com os diferentes ensaios (*Grip-Test*, Mancha de Areia e Pêndulo). Os mesmos foram numerados de 1 a 20 e são apresentados no Anexo A (Tabela A.I). Os resultados foram agrupados segundo as duas tipologias de pavimento: camada de desgaste em betão betuminoso denso (Anexo A - Figura A.I; Figura A.II e Figura A.III); betão betuminoso drenante (Anexo A - Figura A.IV, Figura A.V e Figura A.VI). Para este último tipo de pavimento (BBD) foram apenas encontrados dados do ensaio de Mancha de Areia e Pêndulo Britânico no estudo desenvolvido por Santos (2007) e valores de *Grip-Test* no artigo de Antunes *et al.* (2008).

Das várias relações estabelecidas, as que mais se destacam nos diferentes estudos são a variação do valor de GN com o equipamento utilizado por diferentes laboratórios; com a variação da velocidade de ensaio; com diferentes caudais de água (Couchinho, 2011) e, também se verifica o aumento do GN com a fresagem, que consiste no corte de uma ou mais camadas do pavimento por intermédio de processo mecânico a frio (Souza *et al.*, 2005).

Todos os estudos analisados foram cruciais para definir uma primeira relação entre a tipologia dos pavimentos e as respetivas características superficiais.

Depois de estabelecidas estas primeiras analogias relacionadas com a tipologia da camada de desgaste, iniciou-se o desenvolvimento de relações intrínsecas entre os parâmetros (C_1 , C_2 e C_3) e as características superficiais, medidas através de ensaios (Mancha de Areia e *Grip-Test*) da camada de desgaste. Para estabelecer uma primeira relação foi necessário conhecer previamente as definições teóricas de C_1 , C_2 e C_3 do modelo de Burckhardt onde, C_1 é considerado o parâmetro caracterizador do valor máximo da curva de atrito; C_2 é a constante caracterizadora da forma da curva de atrito e C_3 constante definidora da diferença entre o valor do máximo da curva de atrito e o valor de razão de deslizamento igual a 1.

A primeira exploração teórica sobre a interdependência dos parâmetros de Burckhardt e os valores obtidos através de ensaios de caracterização da superfície do pavimento envolveu o estudo das relações entre estes valores e C_1 .

Foi então possível verificar que o parâmetro C_1 está, senão diretamente relacionado, fortemente correlacionado com o valor de *Grip-Test* (GN). Na Figura 5.1 apresenta-se a hipótese da substituição direta de C_1 pelos valores de GN obtidos a partir dos valores

médios, máximos e mínimos resultantes dos estudos consultados (Tabela 5.1). Salienta-se que as curvas obtidas situam-se todas na vizinhança inferior à curva “BB molhado” do modelo de Burckhardt, este facto favorece o argumento da forte correlação entre GN e C_1 , uma vez que, o ensaio em questão é realizado em condições molhadas como descrito no capítulo 2. Pode então verificar-se que existe uma distinção entre as curvas μ -s molhadas e secas, que tem de ser tomada em consideração na formulação a desenvolver.

Assim, mantendo-se os coeficientes C_2 e C_3 obtidos para o betão betuminoso molhado do modelo de Burckhardt, e considerando $C_1=GN=0,85$ na primeira curva e $C_1=1,28$ na segunda, conforme a Figura 5.2, verifica-se que o comportamento começa a divergir ligeiramente, torna-se portanto pertinente corrigir C_1 obtido através de GN, por forma a considerar a maior ou menor presença de água no pavimento, assunto a que se voltará mais adiante. Note-se que o valor de $GN=0,85$ é o valor máximo dos ensaios analisados e $C_1=1,28$ é o valor do parâmetro C_1 na curva do modelo de Burckhardt para pavimento seco.

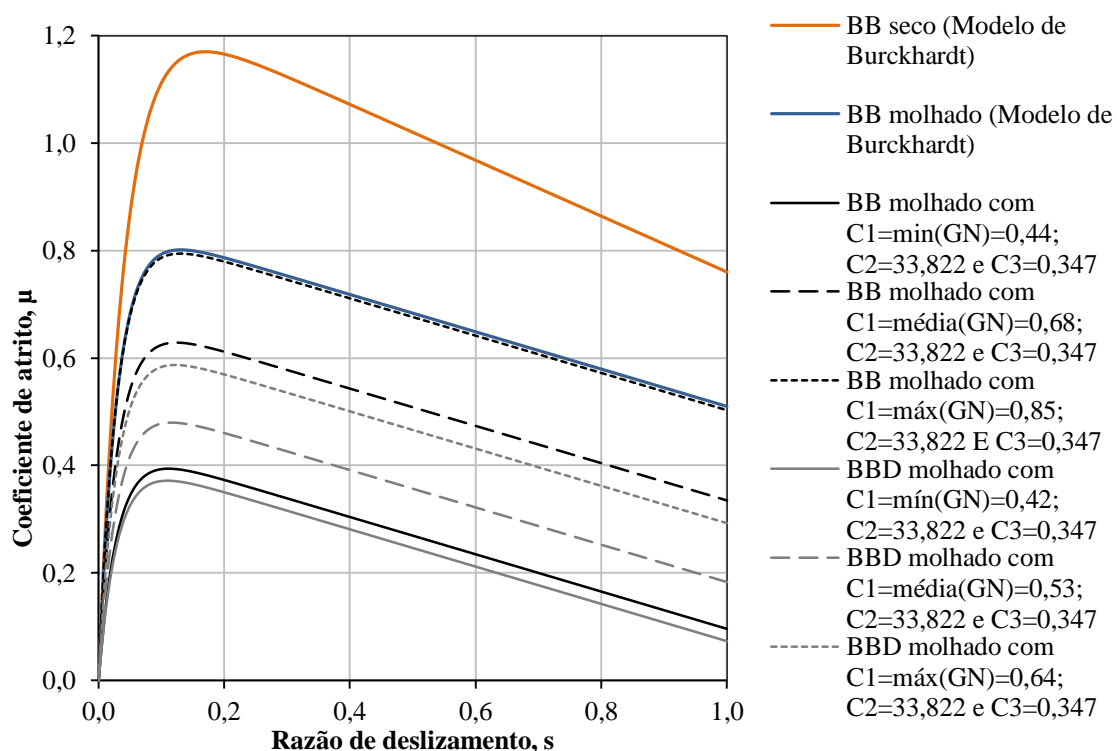


Figura 5.1. Verificação gráfica da substituição do parâmetro C_1 do modelo de Burckhardt pelo valor de GN (valores médios, máximos e mínimos dos estudos em análise)

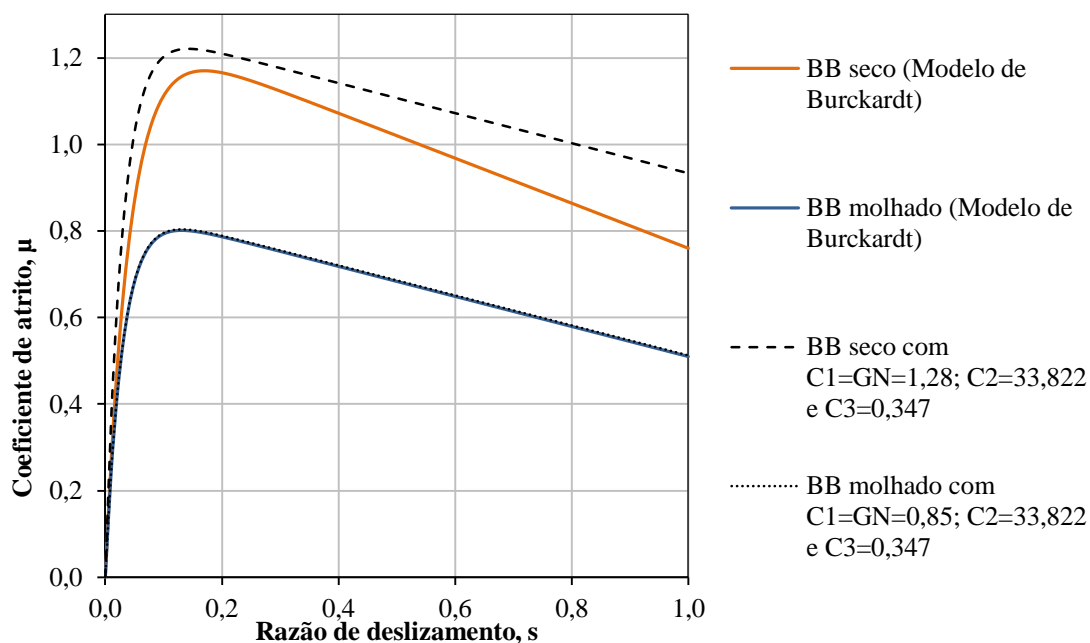


Figura 5.2. Variação do parâmetro C_1 baseado em GN no pavimento molhado e seco

Tabela 5.1. Resultados da análise estatística dos dados bibliografia

	BB			BBD		
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
GN	0,68	0,85	0,44	0,53	0,64	0,42
MTD (mm)	0,69	1,37	0,21	1,46	1,60	1,20
PTV	61,12	81,24	46,88	65,44	70,00	60,00

Em relação ao parâmetro C_2 , relativo à forma da curva, tal como previsto pelo modelo de Burckhardt, verificou-se que é sensivelmente igual para os mesmos materiais de pavimentação. Como verá a seguir, para pavimento cujo padrão das curvas de Burckhardt se enquadra em “betão betuminoso”, verificou-se que C_2 pode ser estimado a partir de MTD.

Por último, C_3 , que segundo o modelo de Burckhardt, representa a diferença entre o coeficiente de atrito máximo (valor de pico da curva) e o coeficiente de atrito para $s=1$ (coeficiente de atrito no bloqueio), afigura-se como sendo o mais difícil de derivar a partir dos valores dos ensaios GN e MTD, uma vez que o valor deste parâmetro na fórmula de Burckhardt, em pavimentos secos, é superior em comparação com o valor nos pavimentos molhados, portanto dependerá da altura de água sobre o pavimento.

Sabendo que o parâmetro C_3 está relacionado com a degradação do coeficiente de atrito durante a travagem, é esperado que a macrotextura do pavimento desempenhe um papel

importante na sua definição. Na Figura 5.3 mostra-se o efeito duma substituição direta do parâmetro C_3 pelos valores de MTD obtidos em pavimentos com superfícies em betão betuminoso secos (valores obtidos nos estudos anteriormente referidos e que constam no anexo A). Como se esperava, verifica-se que o comportamento de C_3 , embora relacionado com o valor de MTD, estende-se muito para além do efeito direto da macrotextura.

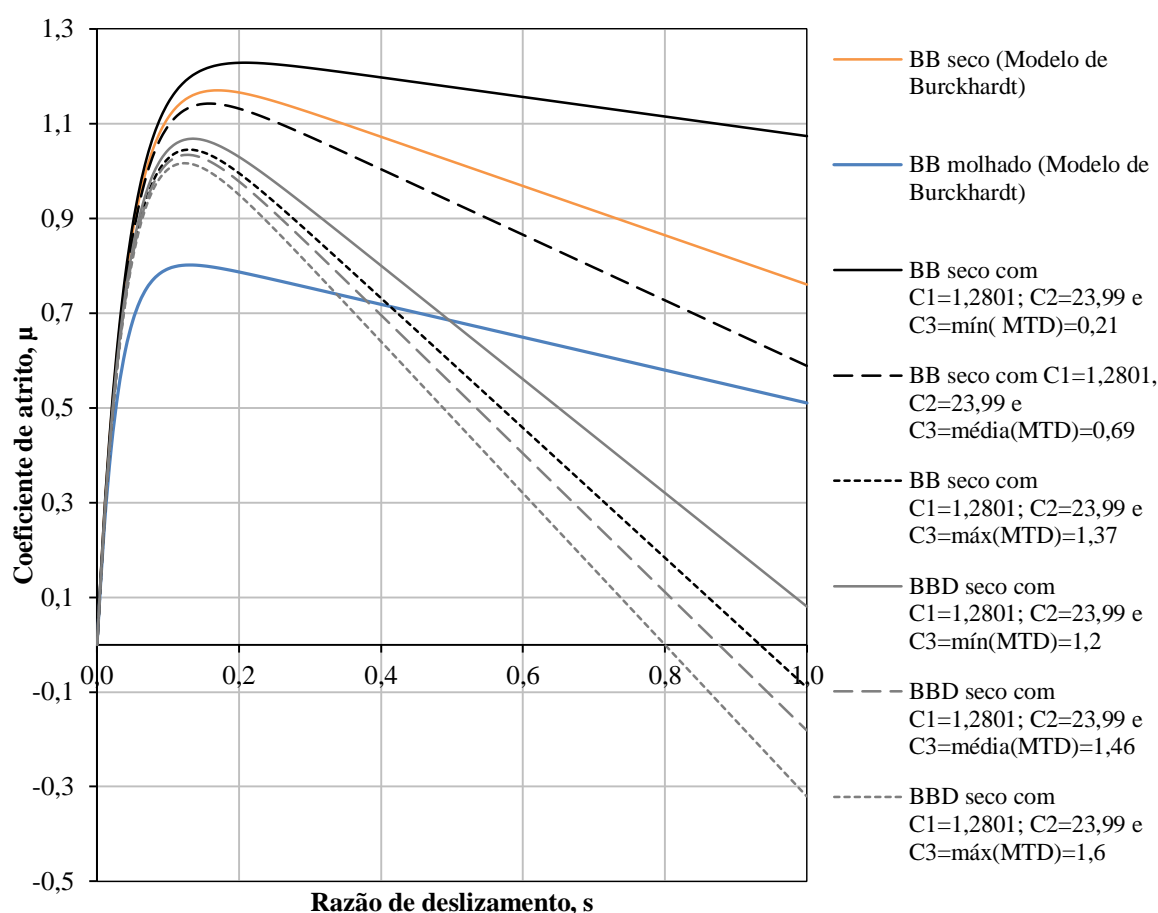


Figura 5.3. Verificação gráfica de substituição do parâmetro C_3 do modelo de Burckhardt pelo valor de MTD (valores médios, máximos e mínimos dos estudos em análise)

5.2. Ajuste da metodologia de obtenção dos parâmetros de Burckhardt através de características no pavimento de secções reais

Tendo por base os princípios de dependência assumidos anteriormente e com dados de ensaios de *Grip-Test* e Mancha de Areia de um estudo realizado em condições bem conhecidas sob pavimentos de dois troços de autoestrada cujas características são bem definidas, aproximaram-se às curvas do modelo de Burckhardt de betão betuminoso (seco e molhado) as curvas resultantes de princípios físicos relacionados com o comportamento mecânico da interação pneu-pavimento de betão betuminoso.

Os dados fornecidos (ASCENDI, 2015) foram registados num lanço da A25 em betão betuminoso denso e num lanço da A29 com camada de desgaste em betão betuminoso drenante (Tabela 5.2).

Tabela 5.2. Valores de *Grip-Test* e Mancha de Areia dos lanços da A25 e A29

Estrada	Sentido	Via	<i>Grip-Test</i> (GN)			Mancha de Areia (MTD) (mm)		
			Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
A25 Via A	Crescente	Direita	0,620	0,320	0,536	2,020	0,700	1,022
A25 Via B	Crescente	Esquerda	0,670	0,350	0,603	1,990	0,720	1,018
A25 Via C	Decrescente	Esquerda	0,680	0,350	0,608	2,140	0,700	0,900
A25 Via D	Decrescente	Direita	0,630	0,350	0,543	1,990	0,700	0,971
A29 Via A	Crescente	Esquerda	0,670	0,340	0,466	1,460	0,950	1,220
A29 Via B	Crescente	Direita	0,710	0,370	0,553	1,950	0,920	1,193
A29 Via C	Decrescente	Direita	0,740	0,360	0,545	1,710	0,800	1,174
A29 Via D	Decrescente	Esquerda	0,650	0,310	0,440	1,360	0,830	1,160

Inicialmente, obtiveram-se as relações apresentadas nas equações 5.1, 5.2 e 5.3 para pavimentos em BB considerados secos até uma altura de água de 60% do valor de MTD. Os valores de ensaios utilizados foram os valores médios dos ensaios caracterizadores (GN e MTD) para a via A em betão betuminoso denso (Figura 5.4).

$$C_1 = 2,4GN \quad (5.1)$$

$$C_2 = 24MTD \quad (5.2)$$

$$C_3 = \frac{h_w}{MTD} \quad (5.3)$$

Nesta abordagem o C_3 para além de se relacionar com o MTD relacionou-se com a altura efetiva de água, h_w^* . Este parâmetro foi introduzido de modo a caracterizar a altura de água real que contribui no processo de interação pneu-pavimento, traduzido pela equação 5.4. Esta é a altura assumida como a altura de água à pressão originada pela interação veículo-pavimento na camada de desgaste, num valor máximo igual à unidade para um valor de h_w igual ao valor do ensaio mancha de areia.

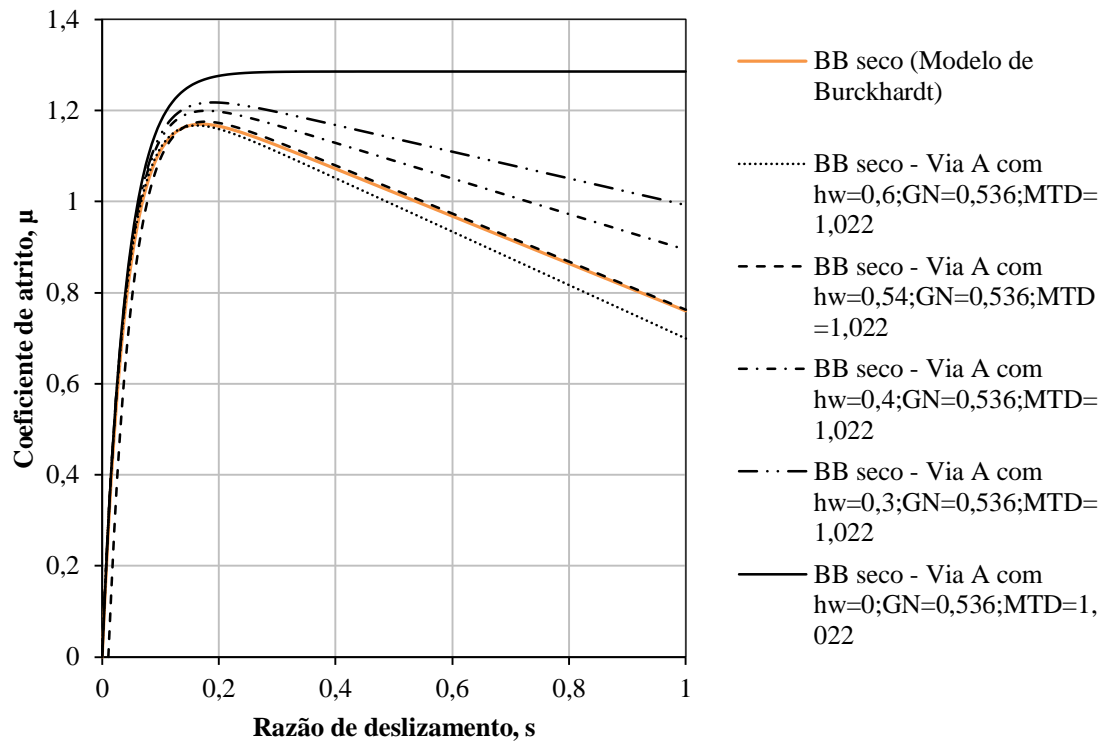


Figura 5.4. Curvas μ -s para pavimentos secos - primeira proposta

$$h_w^* = \frac{h_w}{MTD} \quad (5.4)$$

As relações das equações 5.5, 5.6 e 5.7 foram adotadas para pavimentos molhados (Figura 5.5). Para aplicação destas expressões assumiu-se que o pavimento estará em condições molhadas com uma altura de água superior a 60% do valor de MTD, isto é, as equações referidas apenas se empregam quando a altura de água é superior à percentagem enunciada.

$$C_1 = 1,63GN \quad (5.5)$$

$$C_2 = 30MTD \quad (5.6)$$

$$C_3 = \frac{h_w}{MTD} \quad (5.7)$$

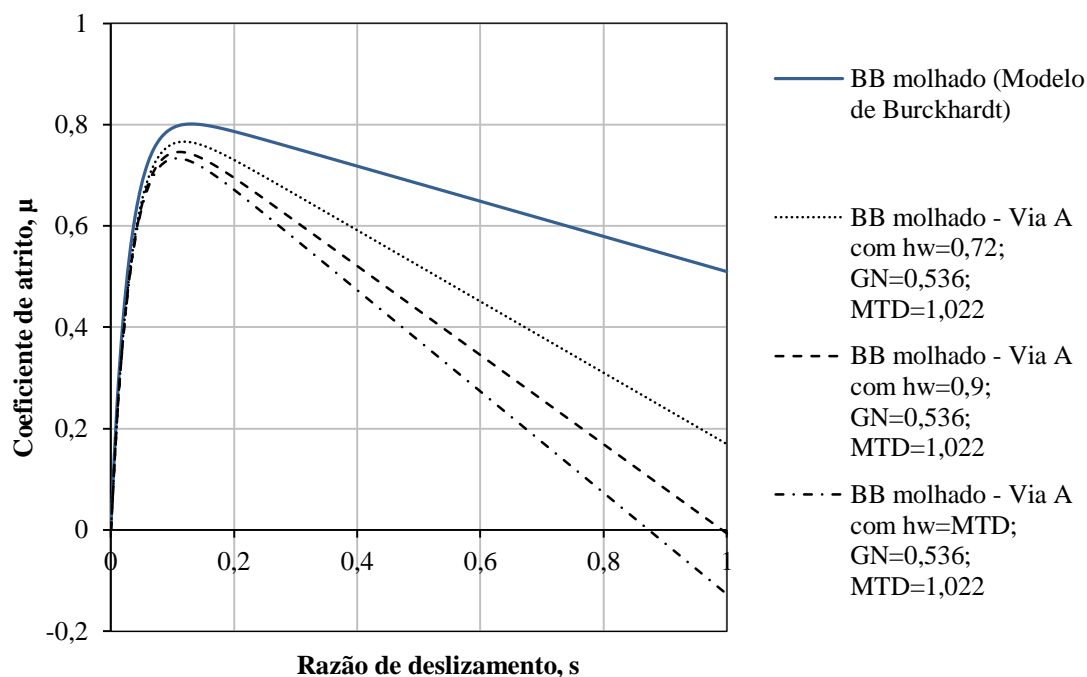


Figura 5.5. Curvas μ -s para pavimentos molhados - primeira proposta

Visualiza-se na Figura 5.5 que quando a altura de água é igual ao valor de MTD, os coeficientes de atrito correspondentes, a partir de um deslizamento elevado (aproximadamente $s=0,87$), decrescem para valores negativos significando que a altura de água que se está a considerar é uma altura de efeito efetivo na pressão da água na interface pneu-pavimento, a qual se pode designar por h_w^* para distinguir da altura de água livre possivelmente existente no pavimento, h_w . Quando esta altura de água é igual ou superior o valor de MTD, h_w^* toma valores superiores a 1, o pneu deixa de estar em contacto com a textura do pavimento dando origem ao efeito de hidroplanagem, nessas condições, μ tende para “0”. Os valores negativos apresentados na figura em análise são apenas ilustrativos da influência da altura de água efetiva na interação do pneu pavimento, sendo que a curva apenas deverá alcançar o valor nulo de coeficiente de atrito.

De modo, a tentar ajustar o parâmetro C_3 , com base nos valores de MTD e h_w , propôs-se a equação 5.8 como alteração de C_3 , atingindo-se uma curva semelhante à do modelo de Burckhardt (Figura 5.6), porém apenas válida para as características da via A em BB. Para uma aplicação nas restantes vias (B, C e D), como se pode ver a partir da Figura 5.7, verifica-se que as curvas, utilizando a expressão de C_3 da equação 5.8, não tomam um comportamento semelhante à curva de Burckhardt de BB molhado (curva de referência), tornando-se por isso necessário uma nova formulação.

$$C_3 = \frac{\left(\frac{h_w}{MTD} - (MTD - h_w) \right)}{1,1} \quad (5.8)$$

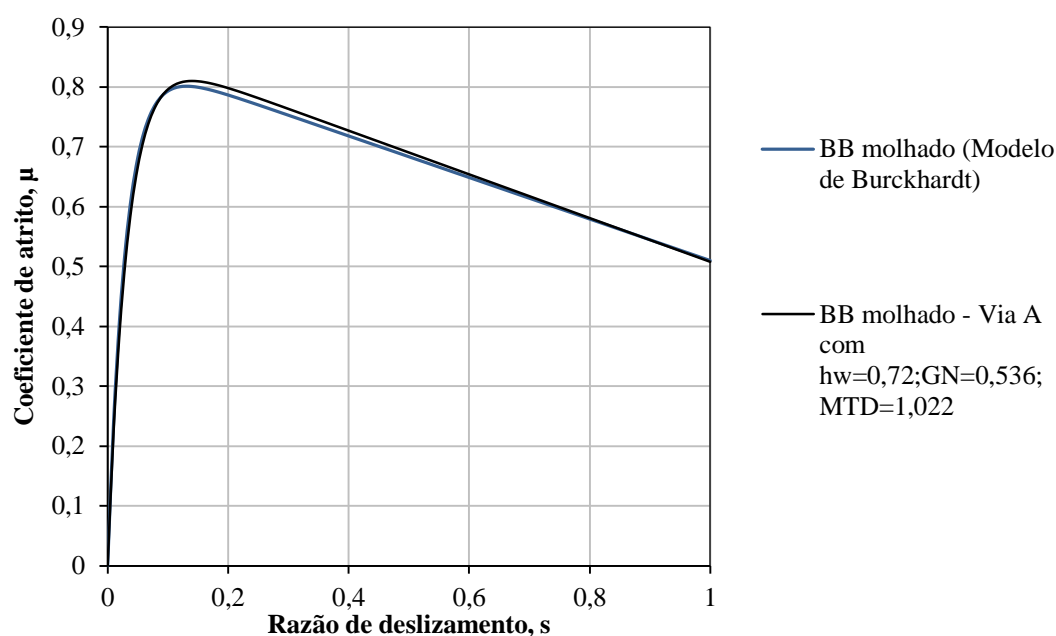


Figura 5.6. Curvas μ -s para BB molhados (via A) - primeira proposta e alteração de C_3

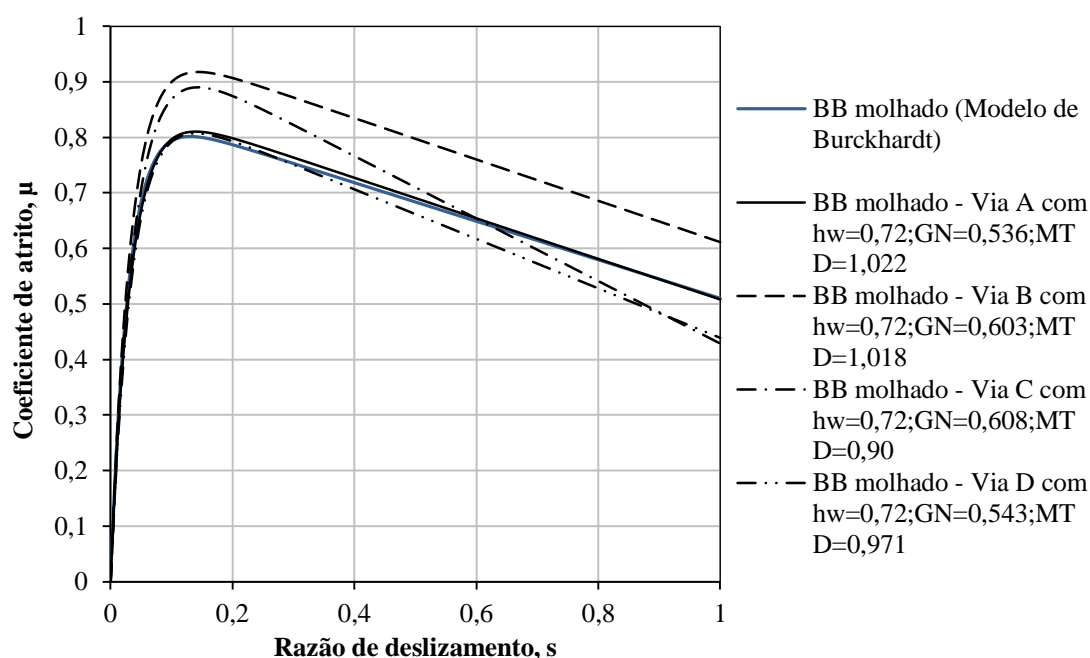


Figura 5.7. Curvas μ -s para BB molhados (via A, B, C e D) - primeira proposta e alteração de C_3

A Figura 5.7, como já referido anteriormente, comprova então a não generalidade da formulação apresentada para C_3 , pois a utilização das expressões 5.5, 5.6 e 5.8 apenas

aproxima a curva correspondente aos valores de ensaio da via A da curva do modelo de Burckhardt.

Como já mencionado, pelo modelo de Burckhardt verifica-se que o comportamento de C_3 em pavimento seco e molhado é distinto, significando que C_3 depende da altura de água, como já comprovado, mas constata-se também que a intervenção da altura de água no parâmetro C_3 é insuficiente para descrever o comportamento das curvas de Burckhardt, como se verifica nas curvas apresentadas, não é apenas a degradação do valor do coeficiente de atrito na travagem que é influenciado, também, o valor de pico (proporcional a C_1), que se viu ser fortemente influenciado por GN, é afetado pela altura de água sobre o pavimento.

Assim, através de um processo iterativo, alcançaram-se as equações 5.9, 5.10 e 5.11 válidas para condições em que a água presente é só a utilizada para a realização do ensaio de *Grip-Test*, aqui designadas por condições “secas”. Numa tentativa de melhorar a aproximação considerou-se que em condições secas o pavimento tem uma altura de água de 0,52 mm, isto surge devido ao facto de o ensaio de *Grip-Test* ser realizado em condições húmidas próximas desta condição.

$$C_1 = 2,4GN \quad (5.9)$$

$$C_2 = 24MTD \quad (5.10)$$

$$C_3 = 1,8GN \times \frac{h_w}{MTD} \quad (5.11)$$

Na Figura 5.8 estão representadas curvas μ -s usando as expressões apresentadas anteriormente.

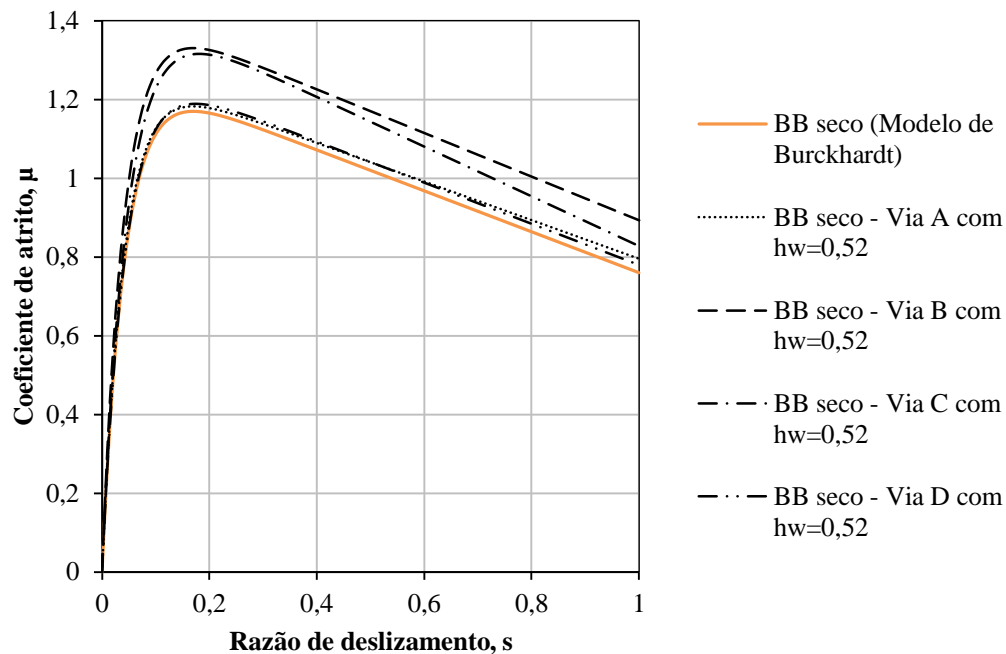


Figura 5.8. Curvas μ -s para BB seco (via A, B, C e D) - segunda proposta

Numa análise seguinte foram assumidas as equações 5.12, 5.13 e 5.14 para o pavimento em condições molhadas com uma altura de água de 0,72 mm. Sendo que as respectivas curvas encontram-se na Figura 5.9.

$$C_1 = 1,55GN \quad (5.12)$$

$$C_2 = 30MTD \quad (5.13)$$

$$C_3 = 0,9GN \times \frac{h_w}{MTD} \quad (5.14)$$

As principais diferenças destas expressões com as anteriores, em condições secas, centram-se no coeficiente de ajuste de GN, coeficiente que em condições molhadas se apresenta menor pois o valor de pico do coeficiente de atrito diminui com o aumento da altura de água.

O coeficiente de ajuste do parâmetro C_2 aumenta ligeiramente para condições molhadas, tal como no modelo de Burckhardt, pois a forma da curva tem uma concavidade mais acentuada em condições secas. No entanto, o parâmetro C_2 é claramente dominado pelo valor de MTD, com coeficiente de ajuste C_2/MTD , para pavimentos em betão betuminoso, situados entre 24 e 30.

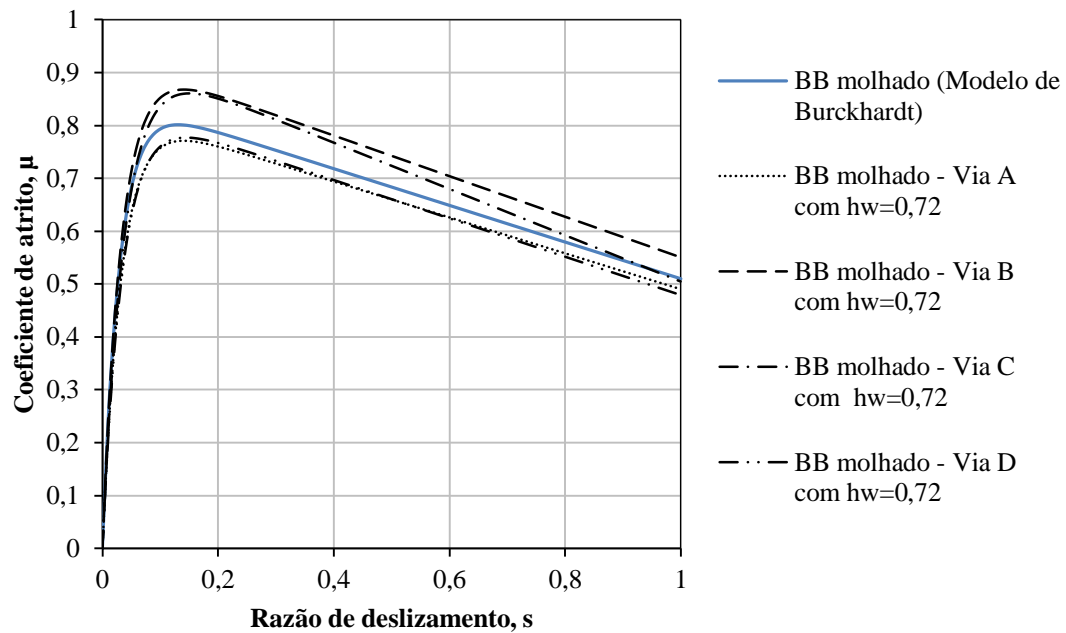


Figura 5.9. Curvas μ -s para BB molhado (via A, B, C e D) - segunda proposta

De seguida, considerando percebido o efeito da altura de água nos coeficientes de ajuste de GN, para diferentes alturas de água, tentou-se formular expressões iguais para o mesmo tipo de camada de desgaste dependentes apenas da altura de água h_w . Para tal, em condições secas a altura de água é agora de 0 mm e não os valores assumidos anteriormente, chegando-se às expressões 5.15, 5.16 e 5.17.

$$C_1 = 2GN - \frac{h_w}{2} \quad (5.15)$$

$$C_2 = 27 MTD \quad (5.16)$$

$$C_3 = n^2 GN + \frac{h_w}{3MTD} \quad (5.17)$$

No parâmetro C_1 , o coeficiente de ajuste foi decomposto considerando a altura de água, de modo a validar este parâmetro para condições secas e molhadas.

O parâmetro C_2 foi assumido como dependente apenas do tipo de material da camada de desgaste em análise, ou seja, como estamos na presença de betão betuminoso este valor apresenta-se invariável, considerando-se na equação 5.16 um valor médio dos assumidos anteriormente pelas equações 5.10 e 5.13 que apresentam semelhante concavidade.

O fator “n” surge da necessidade de assumir a contribuição da altura de pavimento ainda não preenchida com água, sendo $n = 1 - \gamma$, e γ o grau de saturação da superfície da camada de desgaste do pavimento traduzido pela equação 5.18. Este fator contribui de uma forma quadrática neste parâmetro (C_3).

$$n = \frac{(MTD - h_w)}{MTD} \quad (5.18)$$

A Figura 5.10 e a Figura 5.11 ilustram as curvas obtidas através das expressões anteriores. Nesta análise, como já referido, em condições secas, admite-se que a altura de água h_w é de 0 mm e que, em condições molhadas (Figura 5.11), a altura de água assume agora o valor de 0,6 mm.

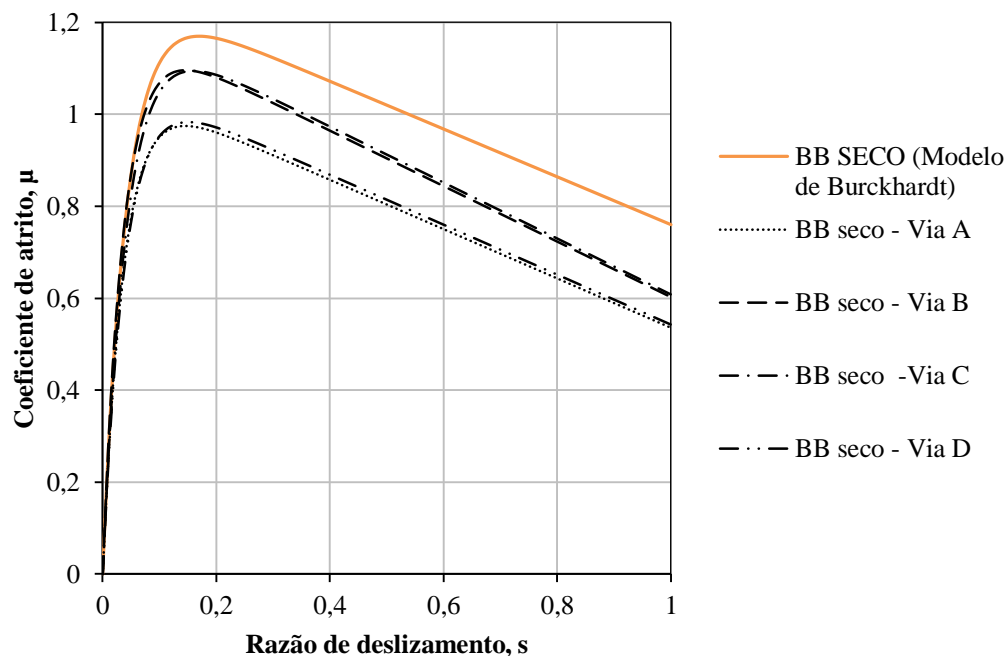


Figura 5.10. Curvas μ -s para BB seco (via A, B, C e D) - terceira proposta

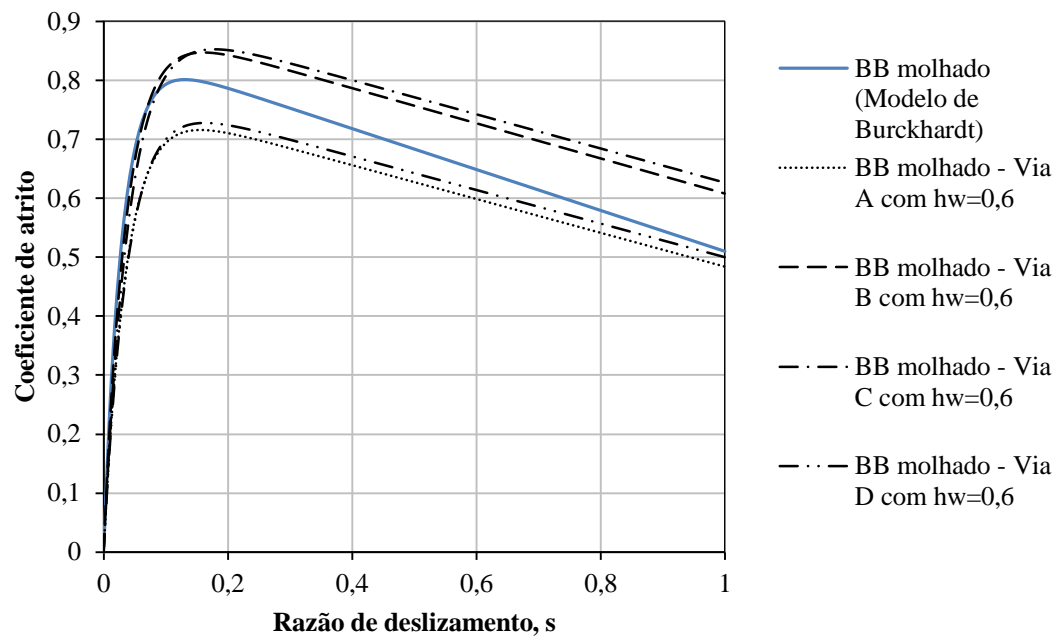


Figura 5.11. Curvas μ -s para BB molhado (via A, B, C e D) - terceira proposta

Através de várias tentativas para uma melhor aproximação às curvas da fórmula de Burckhardt chegaram-se às formulações finais, para cada um dos parâmetros, apresentadas nas equações 5.19, 5.20 e 5.21 para uma camada de desgaste em betão betuminoso denso.

$$C_1 = 2GN - \frac{h_w}{2} \quad (5.19)$$

$$C_2 = 27MTD \quad (5.20)$$

$$C_3 = \frac{4}{5}(n^2GN) + \frac{h_w}{3MTD} \quad (5.21)$$

Onde:

MTD [mm] – profundidade média da textura superficial (valor da Mancha de Areia);

GN – *Grip Number*;

h_w [mm] – altura de água no pavimento

n – coeficiente dependente do grau de saturação da superfície da camada de desgaste (equação 5.18).

Considerando a formulação desenvolvida, apresentada nas equações 5.19, 5.20 e 5.21 para o tipo de camada de desgaste BB, a variação das curvas μ -s apresenta-se nos seguintes gráficos da Figura 5.12. Note-se que em pavimento molhado a altura de água considerada é próxima da altura de água do ensaio de *Grip-Test* ($h_w=0,6$ mm).

Como é possível verificar pela Figura 5.12, nas vias de maior GN, o valor de coeficiente de atrito em situações molhadas aproxima-se, ao longo do deslizamento, do valor de coeficiente de atrito em condições secas, fenómeno mais visível nas vias B e C.

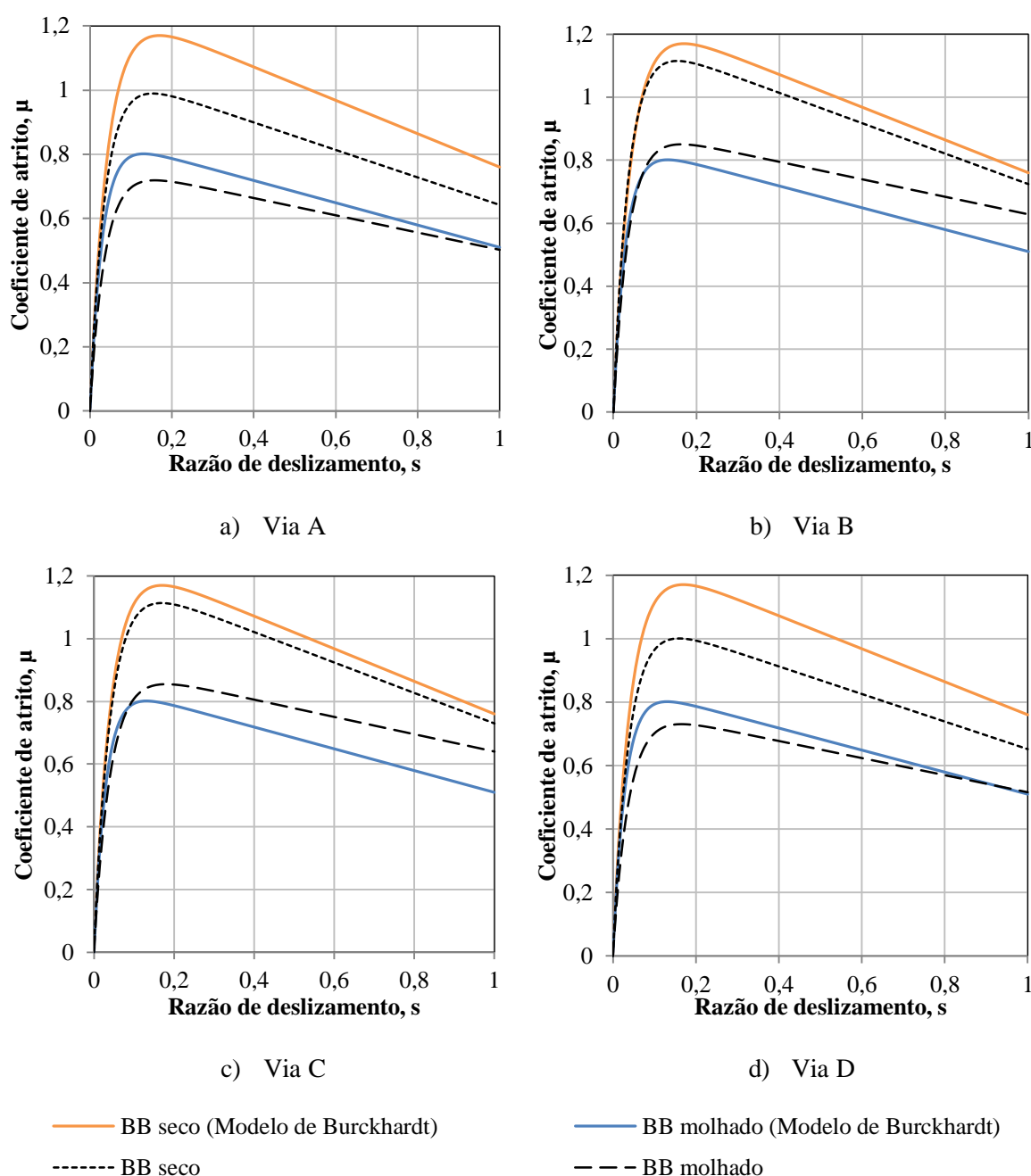


Figura 5.12. Curvas μ -s do modelo desenvolvido para as vias de BB

Assumindo, posteriormente, os valores dos ensaios fornecidos para o tipo de camada de desgaste de betão betuminoso drenante, foram aplicadas as mesmas formulações, no entanto, foi tida em conta a evolução da permeabilidade deste tipo de pavimento. Esta diminui com o fator tempo devido à colmatção de vazios causando uma diminuição da velocidade de percolação. Esta situação é traduzida pelo coeficiente permeabilidade, λ , (equação 5.22) onde k assume o valor de 1 em pavimento novo e o valor de 1,3 em pavimento velho (colmatado).

A definição de “velho” é adotado neste trabalho de modo a considerar as consequências do fator tempo nos pavimentos betuminosos drenantes. Uma vez que não se teve acesso a valores de ensaios da superfície do pavimento em camadas de desgaste com vários anos de serviço, os valores de “ k ” foram meramente indicativos do efeito do tempo produzido no modelo proposto. Caso esses dados fossem disponibilizados o fator tempo estaria refletido nos resultados dos ensaios de *Grip-Test* e de Mancha de Areia.

$$\lambda = \frac{1}{k} \quad (5.22)$$

As formulações admitidas para este tipo de pavimento na determinação dos parâmetros C_1 , C_2 e C_3 são apresentadas nas equações 5.23, 5.24 e 5.25.

$$C_1 = 2GN - \left(\frac{h_w}{2}\right) \frac{1}{\lambda} \quad (5.23)$$

$$C_2 = 27MTD \quad (5.24)$$

$$C_3 = \frac{4}{5}(n^2GN) + \frac{\lambda h_w}{3MTD} \quad (5.25)$$

Onde:

MTD [mm] – profundidade média da textura superficial (valor da Mancha de Areia);

GN – *Grip Number*;

h_w [mm] – altura de água no pavimento

n – coeficiente dependente do grau saturação da superfície da camada de desgaste (equação 5.18);

λ – coeficiente dependente da permeabilidade da camada de desgaste do pavimento (equação 5.22).

Note-se que os resultados apresentados na Figura 5.13 consideram as mesmas formulações base das misturas densas, o que se revela na diferença generalizada, para baixo, nas curvas obtidas em relação às curvas de BB do modelo de Burckhardt. Para fazer o ajuste mais perfeito seria necessário alterar coeficientes de ajustes para além dos incorporados nos “efeitos de k”.

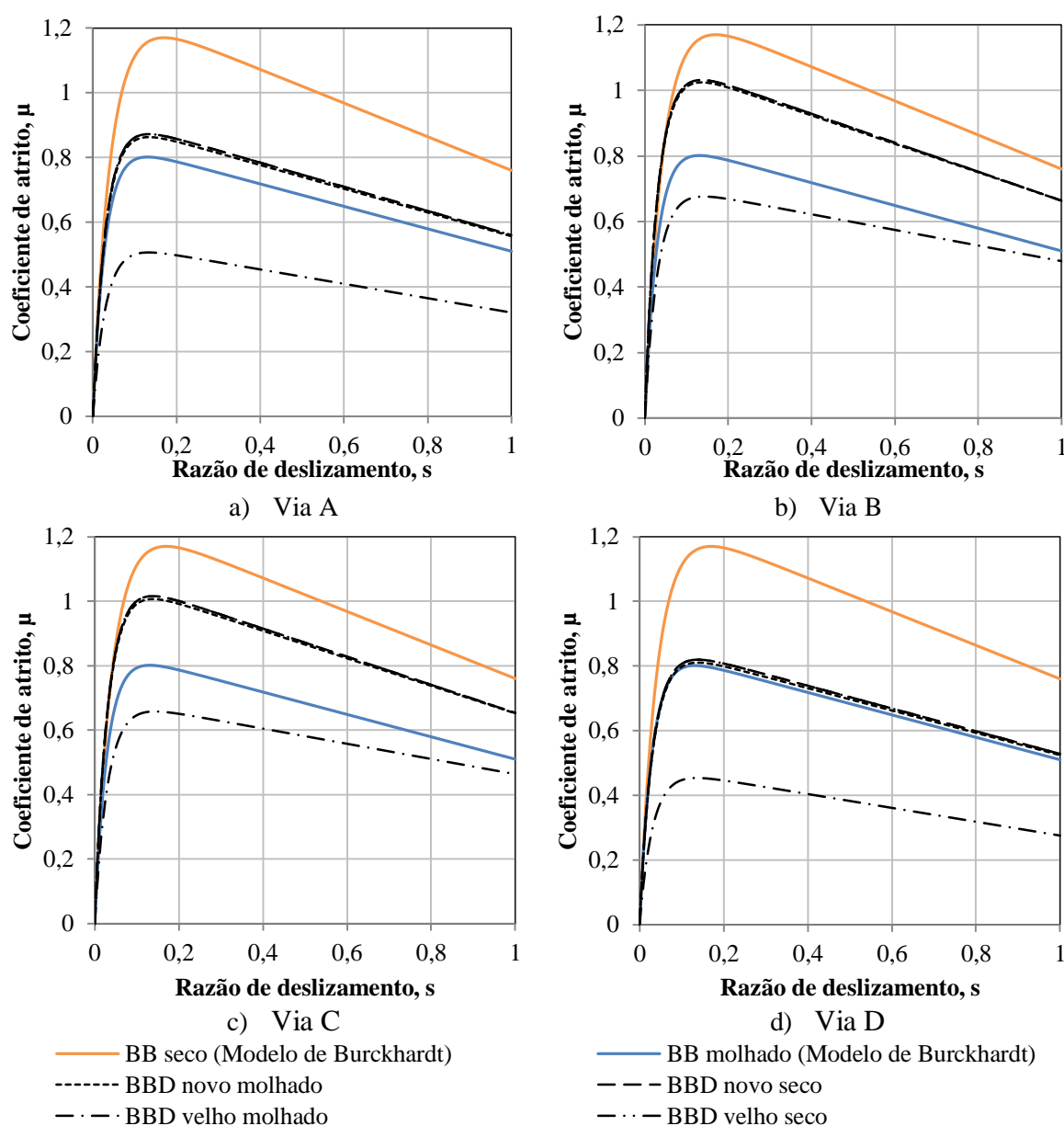


Figura 5.13. Curvas μ - s do modelo desenvolvido para as vias de BB

As curvas μ - s para as condições de novo (seco e molhado) e velho seco afiguram-se muito próximas (com uma diferenciação quase impercetível) facto este devido às características assumidas na formulação proposta para este tipo de pavimento (BBD), em que se assume que em condições “novo molhado” o pavimento apenas apresenta uma

altura de água de 0,02 mm consequência das suas propriedades drenantes no início de vida útil.

Contudo, para a análise do comportamento da formulação proposta em pavimentos drenantes, torna-se mais elucidativo avaliar o desempenho no modelo agora proposto, verificando que em pavimentos molhados e velhos, o coeficiente de atrito assume valores mínimos.

Capítulo 6

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6. Análise e discussão de resultados

As distâncias de travagem são influenciadas fortemente pelas características de aderência fornecidas pela textura e atrito. Neste capítulo, pretende-se comparar as distâncias de travagem obtidas pelo modelo de interação pneu-pavimento desenvolvido, com a formulação de Burckhardt e com a norma de traçado (INIR, 2010), para os diferentes sistemas de travagem dos veículos, sem ABS, com ABS e com ABS modificado, apesar deste último não constituir ainda uma solução de ABS corrente.

As distâncias de travagem dependem dos sistemas de travagem do veículo e, por conseguinte, dos modelos de interação considerados em cada um dos sistemas. Neste capítulo é admitido que o modelo proposto no capítulo 5, dependente dos dados de ensaio de *Grip-Test* e Mancha de Areia, integra o sistema ABS dos veículos. Suposição válida para o tipo de ABS tradicional, em que o seu funcionamento ocorre para uma percentagem de deslizamento longitudinal da roda entre os 10 e os 25% e para o tipo de ABS modificado apresentado em 3.5.1 que ainda carece de implementação prática mas que tem grande potencial e, portanto é analisado neste estudo. O princípio de funcionamento deste difere do tradicional, pelo facto de o sistema entrar em ação para a percentagem de deslizamento longitudinal ideal da roda, onde se verifica o máximo do coeficiente de atrito do pavimento em questão, ou seja, o sistema permite em tempo real determinar o máximo de atrito no pavimento. Assim, tomaram-se em consideração três tipos de veículos: veículo sem ABS (A); veículo com ABS (B) e veículo com ABS modificado (C).

O presente estudo foi realizado considerando apenas manobras de travagem, em estradas sem curvas e considerando os coeficientes de atrito médios obtidos a partir de troços de estradas dos diferentes tipos de pavimento em análise.

6.1. Modelo de Burckhardt

Inicialmente procedeu-se ao estudo aprofundado da formulação de Burckhardt para os tipos de pavimentos abrangidos pelo próprio modelo (neve, betão, betão betuminoso seco, betão betuminoso molhado, paralelos secos e paralelos molhados), usando as constantes da Tabela 4.1 determinaram-se as distâncias de travagem para os três diferentes veículos considerando que estes possuem velocidades de 50, 90, 120 e 140 km/h.

Para esta análise admite-se que os veículos têm de massa 900 kg e um deslizamento total, s_t , assumido de 0,1 m, que é fortemente influenciado pela força de atrito entre a roda e o pavimento.

De modo a avaliar a influência do valor de deslizamento até ao bloqueio total da roda ($s=1$) foi determinada a variação relativa das distâncias de travagem entre o valor assumido de s_t e outros diferentes valores de deslizamento ($s_t= 0,05$ m; 0,2 m; 0,3 m; 0,4 m; 0,5 m; 0,6 m; 0,7 m; 0,8 m; 0,9 m e 1 m) para veículos com e sem ABS para os seis tipos de pavimento.

Verifica-se que o valor de s_t adotado, de um modo geral, não induz uma mudança significativa no cálculo da distância de travagem, pois o máximo de variação relativa obtido para todas as distâncias de deslizamento anteriormente referidas é de 1,90% (Figura 6.1) para veículos sem ABS em pavimento de betão. Assim, e tendo em conta a análise descrita o valor de 0,1 m de deslizamento total do veículo poderá ser adotado.

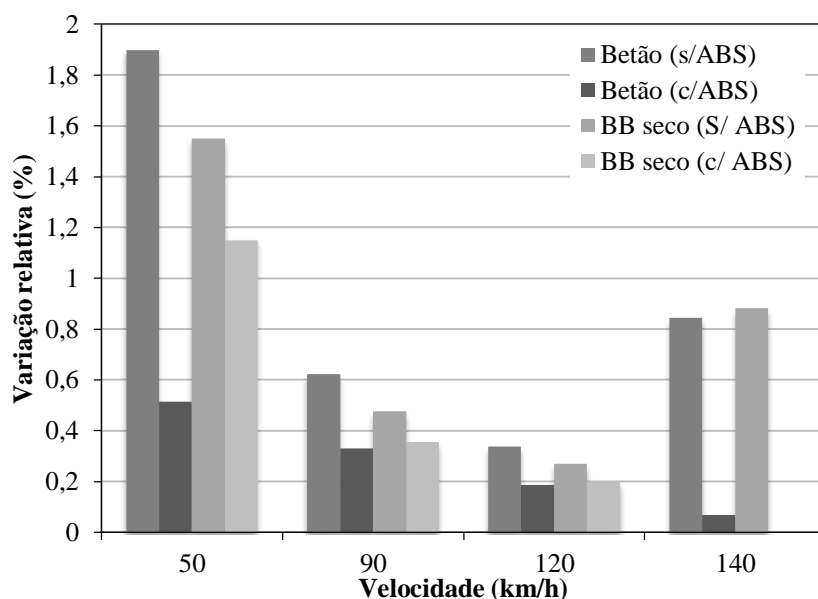


Figura 6.1. Efeito de variação de s_t na distância de travagem em pavimento de Betão e de BB seco para veículos com ABS e sem ABS

A paragem de um veículo ocorre quando o trabalho da força de atrito anula a energia cinética que o veículo detém, sendo esta última, no início da travagem, determinada pela equação 3.6. A Tabela 6.1 apresenta os valores determinados para as diferentes velocidades do veículo, assim como o correspondente trabalho da força de atrito considerados no cálculo das distâncias de travagem.

Tabela 6.1. Valor de energia cinética e do trabalho da força de atrito para as velocidades em estudo

V (km/s)	P (N)	E _c (kJ)	W _{Fa} (kJ)
50	8829	86,805	86,805
90	8829	281,250	281,250
120	8829	500,000	500,000
140	8829	680,555	680,555

Para cada tipo de pavimento em estudo calcularam-se as forças de atrito, F_a , a partir da equação 6.1.

$$F_a = \mu \times P \quad (6.1)$$

Onde:

F_a [N] – força de atrito;

μ – coeficiente de atrito calculado pelo modelo de Burckhardt;

P [N] – peso do veículo.

O coeficiente de atrito, μ , presente na expressão anterior é relativo aos diferentes valores de μ ao longo da curva de Burckhardt em análise. Nos subcapítulos 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3 são apresentados, para cada sistema de travagem em análise, as distâncias de travagem para os seis diferentes tipos de pavimentos, já enumerados, que são considerados no modelo de Burckhardt.

6.1.1. Veículo sem ABS

Quando um veículo sem ABS trava numa situação de emergência, as rodas ficam bloqueadas, o veículo desliza e perde a estabilidade lateral ficando impossibilitado de responder aos comandos de manobra.

Considerando que o máximo de coeficiente de atrito ocorre entre os 10 e 25% da razão de deslizamento longitudinal, divide-se a curva típica da força de atrito em três regiões até ao bloqueio completo da roda e numa quarta região (região crítica) onde se considera a força de atrito constante. A distância percorrida nas regiões A, B e C corresponde a uma percentagem do deslizamento total ($s_t = 0,1$) adotado, como ilustrado na Figura 6.2.

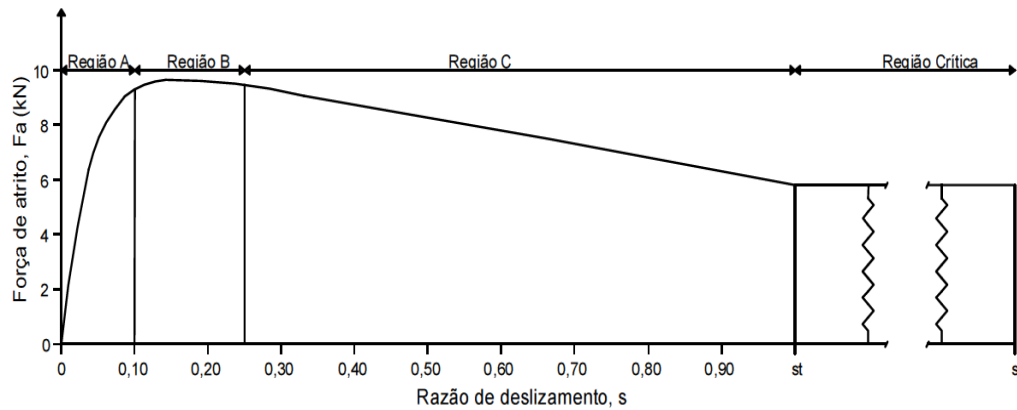


Figura 6.2. Regiões que subdividem a distância de travagem num veículo sem ABS.

Note-se que a região crítica, $r_{crít}$, corresponde à distância que o veículo percorre a partir do momento em que deixa de haver qualquer variação do coeficiente de atrito e estende-se até à paragem do veículo que ocorre quando o trabalho da força de atrito, por um deslizamento, s_p , iguala a energia adquirida pelo veículo em movimento, que na verdade, corresponderá à continuidade do bloqueio das rodas (desde $s=1$) em que o veículo derrapa até à paragem (região correspondente ao estado crítico).

Na realidade, poderá ocorrer uma diminuição do valor da força de atrito, a partir do bloqueio das rodas ou, pelo contrário, um aumento quando há acumulação de material solto à frente do pneu, visível na Figura 3.15, no entanto, para o desenvolvimento deste trabalho foi assumido que não ocorre qualquer alteração no valor desta força.

Sabendo-se que as áreas definidas pela linha da variação da força de atrito nas regiões designadas por A, B e C são definidas pela equação 6.2.

$$r_i = \int_i^j \mu ds \quad (6.2)$$

E que a distância de travagem nessas regiões, i , são calculadas através da equação 6.3.

$$d_i = s_t \times \Delta s_i \quad (6.3)$$

Onde:

d_i [m] – distância percorrida nas regiões em análise dependendo do tipo de veículo;

s_t [m] – deslizamento total do veículo na travagem considerado para o cálculo (0,1m);

Δs – diferença da razão de deslizamento longitudinal na região em estudo e dependendo do tipo de veículo.

Então, o trabalho da força de atrito nas regiões em análise é calculado pela equação 6.4.

$$W_{Fa_i} = r_i \times P \times d_i \quad (6.4)$$

Onde:

W_{Fa_i} [J] – trabalho da força de atrito nas regiões em análise, dependentes do sistema de travagem ;

r_i – coeficiente de atrito ao longo da região em estudo;

P [N] – peso do veículo em estudo.

Num veículo sem ABS, como já se referiu, a paragem deste só ocorrerá quando o trabalho da força de atrito igualar a energia cinética, nessa situação o trabalho da força de atrito, W_{Fa_p} , traduz-se na equação 6.5.

$$W_{Fa_p} = E_C - \sum_{r=i}^{r=j} W_{Fa_i} \quad (6.5)$$

Onde:

W_{Fa_p} [J] – trabalho da força de atrito com rodas bloqueadas;

E_C [J] – energia cinética que anima o veículo às diferentes velocidades;

W_{Fa_i} [J] – trabalho da força de atrito nas regiões, i, em estudo, antes do bloqueio.

A distância percorrida pelo veículo após bloqueio, até parar, d_{crit} , foi calculada pela equação 6.6.

$$d_{crit} = \frac{W_{Fa_p}}{F_{a_p}} \quad (6.6)$$

Onde:

d_{crit} [m] – distância percorrida em derrapagem;

W_{Fa_p} [J] – trabalho da força de atrito com rodas bloqueadas;

F_{a_p} [N] – força de atrito constante ao longo da distância percorrida com rodas bloqueadas.

Por fim, a distância de travagem é dada pela equação 6.7.

$$d_t = \sum_{i=0}^{i=j} d_i + d_{cri} \quad (6.7)$$

Onde:

d_t [m] – distância de travagem;

d_i [m] – distância percorrida nas regiões em análise.

A Figura 6.3 ilustra a variação da distância de travagem para diferentes velocidades num veículo sem ABS para os seis tipos de pavimentos apresentados no modelo de Burckhardt. A distância de travagem aumenta com o aumento da velocidade, sendo maior quando o pavimento se encontra coberto de neve e para pavimentos molhados devido ao facto de os pneus perderem o contacto com a superfície do pavimento.

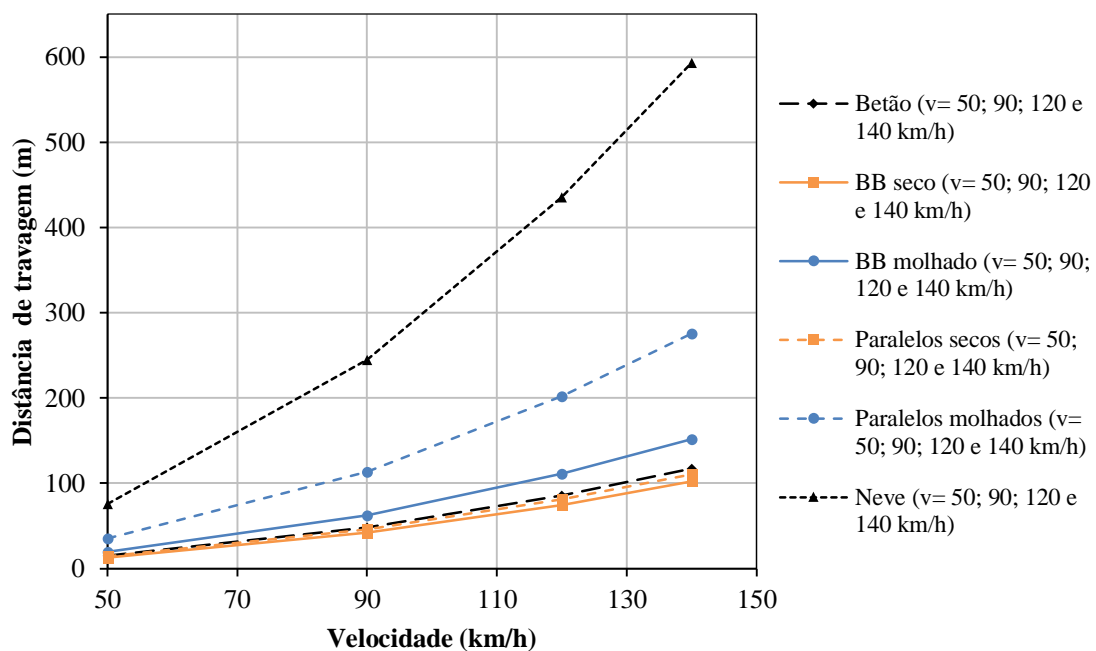


Figura 6.3. Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para os pavimentos que constam no modelo de Burckhardt

6.1.2. Veículo com ABS

O sistema ABS evita o bloqueio da roda e a derrapagem do veículo. Este sistema entra em funcionamento para uma razão de deslizamento longitudinal entre 0,1 e 0,25, situados no intervalo em que o coeficiente de atrito é, geralmente máximo nos diferentes tipos

pavimento. À semelhança do realizado para os veículos sem ABS, o cálculo da distância percorrida em travagem foi efetuado de acordo com as regiões de travagem, neste caso, as da Figura 6.4.

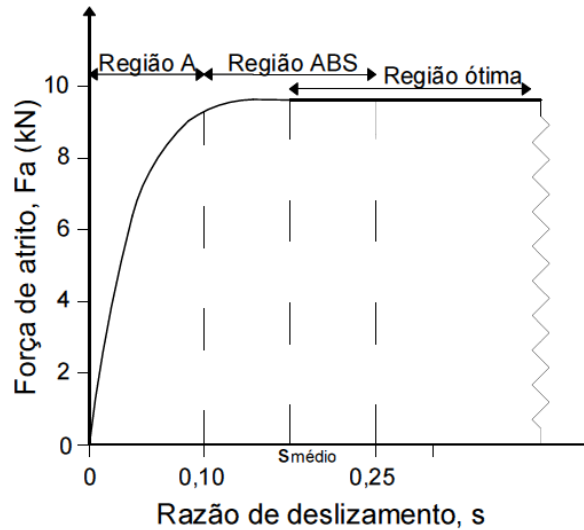


Figura 6.4. Regiões que subdividem a distância de travagem num veículo com ABS

Salienta-se que a região dominada por “Região ABS” designa o intervalo de funcionamento dos ciclos de ABS e que a região denominada por “Região ótima” ($r_{ótima}$) corresponde à distância que o veículo percorre a partir do momento em que o veículo usa um valor de coeficiente de atrito alto. Este valor ocorre para uma determinada percentagem de deslizamento longitudinal, denominada por $s_{médio}$.

As regiões, r_A e r_{ABS} foram determinadas com recurso à equação 6.2, pois a força de atrito aumenta até ao valor de deslizamento longitudinal de 0,1 e os ciclos de ABS ocorrem para uma razão de deslizamento que varia no intervalo de 0,1 a 0,25. Também o cálculo das distâncias d_A e d_{ABS} , foi realizado de acordo com a equação 6.3. O trabalho da força de atrito na região ótima, $W_{Fa_{ótima}}$, foi determinado pela equação 6.8, a distância de travagem na região ótima, $d_{ótima}$, pela equação 6.9 e a distância de travagem pela equação 6.10.

$$W_{Fa_{ótima}} = E_C - \sum_{r=i}^{r=j} W_{Fa_i} \quad (6.8)$$

Na equação 6.9, a $F_{a_{ótima}}$ é definida pela força de atrito máxima considerada pelo sistema de travagem.

$$d_{\acute{o}tima} = \frac{W_{Fa_{\acute{o}tima}}}{F_{a_{\acute{o}tima}}} \quad (6.9)$$

$$d_t = \sum_{i=0}^{i=j} d_i + d_{\acute{o}tima} \quad (6.10)$$

A Figura 6.5 ilustra a variação da distância de travagem com a variação da velocidade do veículo com ABS nos seis diferentes tipos de pavimentos em análise. Tal como no veículo anterior, a distância de travagem aumenta com o aumento da velocidade do corpo, assim como, com o estado do pavimento relativamente à presença de água pois a película de água impede ou dificulta o contacto do pneu com o pavimento.

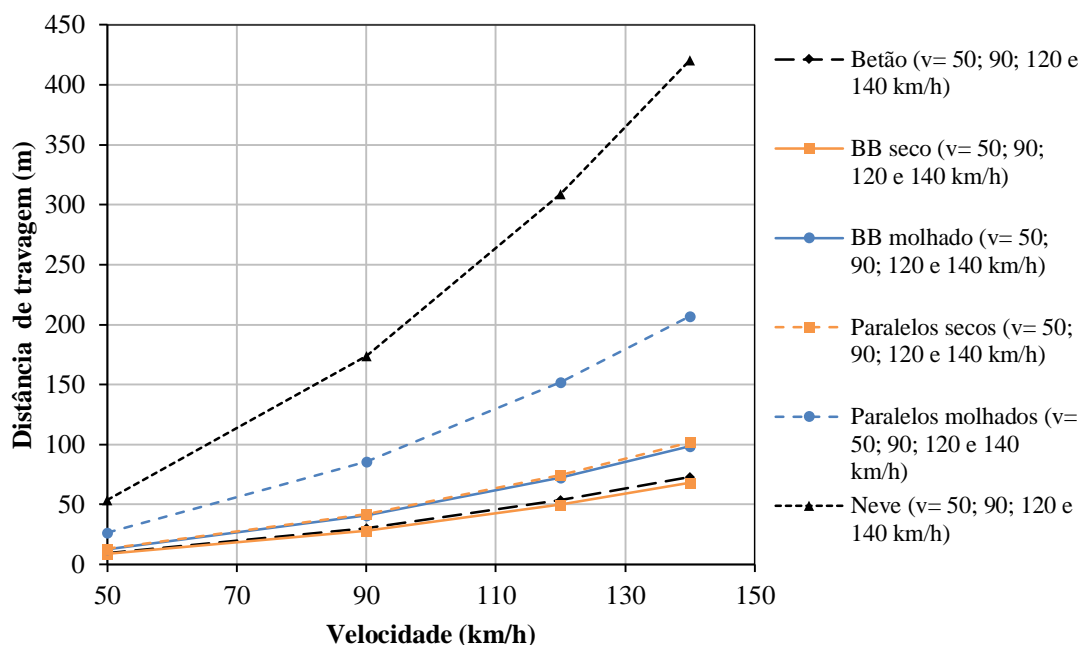


Figura 6.5. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para os pavimentos que constam no modelo de Burckhardt

Nos veículos com ABS as distâncias de travagem diminuem comparativamente com os veículos sem ABS cerca de 31,8%, exceto para o pavimento coberto de neve que apenas reduz 0,01% da distância de travagem, o que permite afirmar que, neste tipo de condições, o ABS não provoca qualquer melhoria na distância travagem.

6.1.3. Veículo com ABS modificado

O sistema ABS modificado identifica em tempo real o tipo de pavimento e entra em funcionamento no valor ideal de percentagem de deslizamento longitudinal (s_i).

A região A, r_a , representada na Figura 6.6 é calculada pela equação 6.2, onde o limite superior é dado pelo valor da razão de deslizamento ideal, s_i , correspondente ao máximo coeficiente de atrito do pavimento em análise. A distância percorrida nessa região é calculada pela equação 6.3 e o trabalho da força de atrito ao longo dessa distância é dado pela equação 6.4.

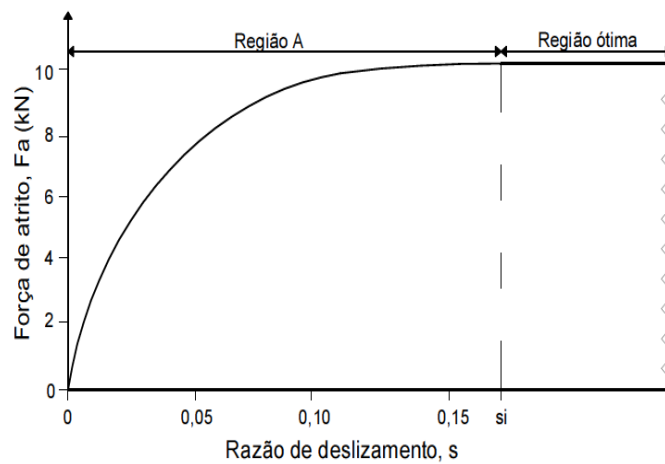


Figura 6.6. Regiões que subdividem a distância de travagem num veículo com ABS modificado

A energia cinética é anulada pelo trabalho da força de atrito ao longo da região A e da região ótima ($r_{ótima}$), deste modo, o trabalho da força de atrito na região ótima, $W_{Fa_{ótima}}$, foi determinado, à semelhança do sistema anterior, pela equação 6.8, a distância de travagem na região ótima, $d_{ótima}$, pela equação 6.9 e a distância de travagem pela equação 6.10.

A Figura 6.7 ilustra a variação da distância de travagem nas diferentes velocidades em análise com a variação do trabalho da força de atrito num veículo com ABS modificado, onde é possível verificar que a distância de travagem aumenta à medida que a velocidade aumenta.

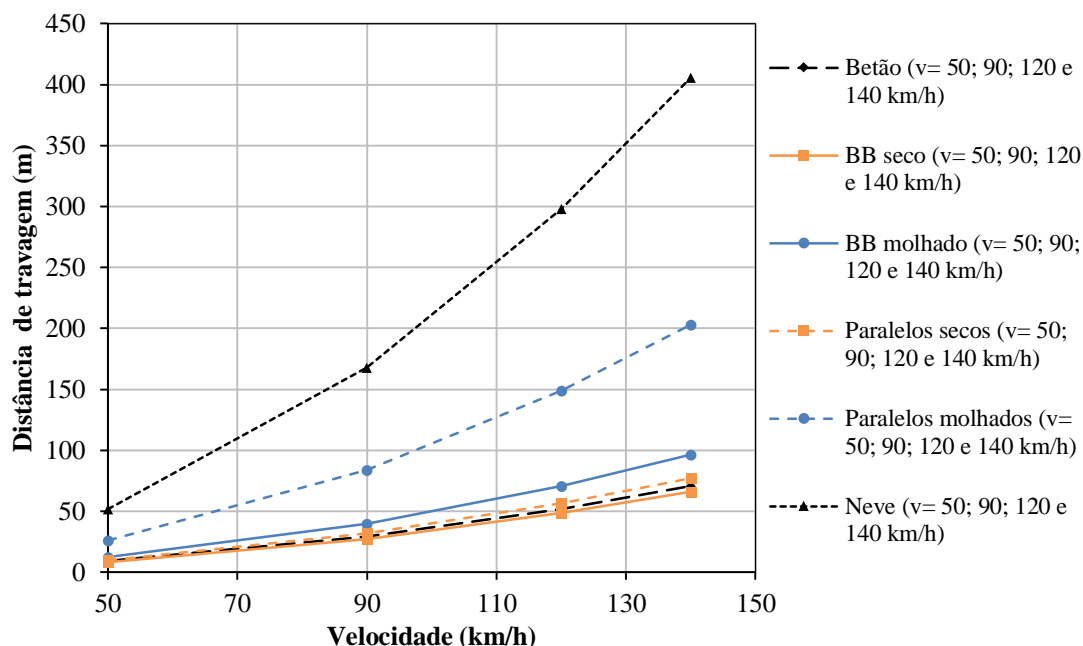


Figura 6.7. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para os pavimentos que constam no modelo de Burckhardt

Segundo a Figura 6.7 o veículo equipado com o sistema ativo de ABS modificado comparativamente ao tradicional sistema diminui em cerca de 3,0% a distância de travagem, exceto nos paralelos secos cujo valor decresce cerca de 24%, sendo, portanto este tipo de pavimento um exemplo das vantagens do sistema de ABS modificado. Ou seja, este avanço do sistema de ABS irá fazer com que o processo de ciclos de ABS ocorra no máximo de coeficiente de atrito do pavimento que se situa na razão de deslizamento s_i e não no intervalo pré-definido de $[0,1; 0,25]$. Mais ainda, quando comparadas as distâncias de travagem deste veículo C com o veículo A, sem sistema ABS, ocorre uma diminuição em cerca de 33,2%.¹⁵

6.2. Modelo de interação pneu-pavimento desenvolvido

Da mesma forma que o efetuado para o modelo de Burckhardt, também com o modelo de interação pneu-pavimento são calculadas as distâncias de travagem para veículos sem ABS, com ABS e com ABS modificado admitindo que estes estão dotados de uma velocidade de 50, 90, 120 e 140 km/h.

¹⁵ Todas as percentagens apresentadas tomam em consideração os valores do problema em causa ($m=900\text{kg}$, $s_i=0,1$; velocidades de 50;90;120;140 km/h)

Mais uma vez, e de modo a possibilitar comparações entre os modelos, é admitido uma massa de 900 kg para o veículo em questão e um deslizamento total, s_t , de 0,1 m. Assim, todos os valores apresentados na Tabela 6.1 são também neste subcapítulo válidos.

Salienta-se também que, conforme o sistema de travagem em análise, foram utilizadas as referidas equações apresentadas nos subcapítulos 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3.

6.2.1. Betão betuminoso denso

O modelo de interação pneu-pavimento desenvolvido destaca-se do modelo de Burckhardt, como já foi referido, pelo facto de tomar em consideração as características superficiais dos pavimentos. Deste modo, as distâncias de travagem calculadas dependem das características reais dos pavimentos tornando estes valores mais próximos da realidade existente no pavimento em questão. A fim de visualizar as principais diferenças entre os dois modelos, fundamentais para o cálculo das distâncias de travagem, é apresentado na Figura 6.8 o comportamento das curvas μ - s do modelo de Burckhardt e do modelo de interação proposto, em condições secas e molhadas ($h_w=0,6$ mm), este último para os valores médios dos ensaios disponibilizados (ASCENDI, 2015) das quatro vias. No capítulo 5, estão presentes as curvas para cada uma das vias da autoestrada em questão.

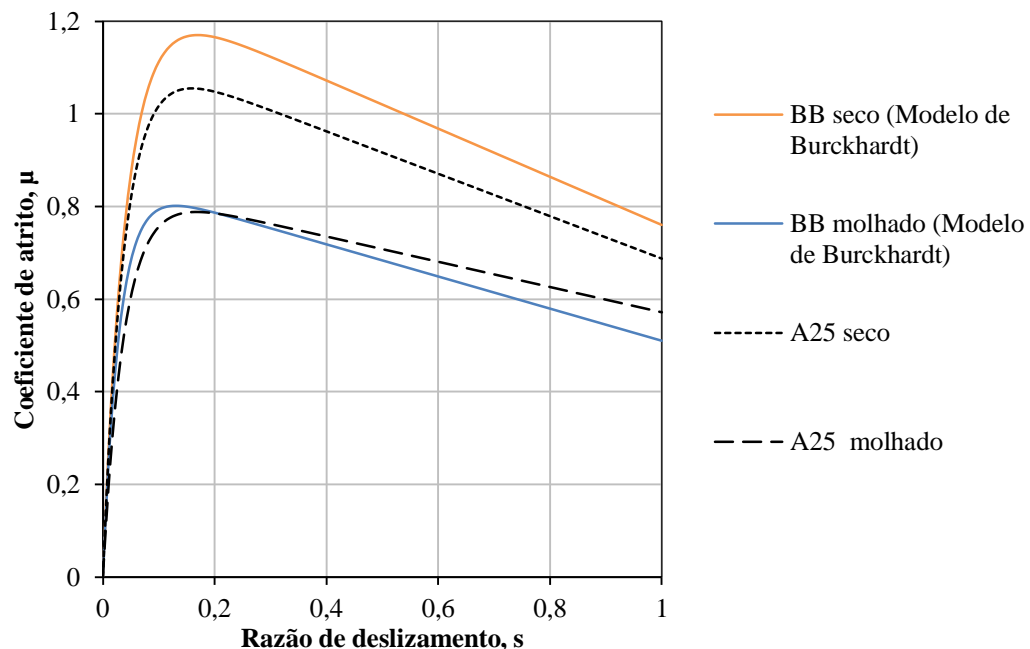


Figura 6.8. Curvas μ - s do modelo proposto para BB e do modelo de Burckhardt

As distâncias de travagem obtidas são apresentadas, neste subcapítulo, para os diferentes tipos de sistema de travagem, distintas condições do piso (seco e molhado) e para duas vias diferentes da autoestrada estudada, a via A correspondente à via da direita no sentido crescente e a via C correspondente à via da esquerda no sentido decrescente. Estas vias foram selecionadas de entre as quatro pois a via C possui valor máximo para o ensaio de *Grip-Test* e mínimo de Mancha de Areia e a via A o inverso (Tabela 5.2). As distâncias de travagem obtidas pelo método de Burckhardt para betão betuminoso (subcapítulo 6.1) são também aqui apresentadas de modo a tornar a interpretação dos resultados obtidos mais simples.

Note-se que as percentagens calculadas neste subcapítulo têm sempre em consideração as distâncias de travagem das duas vias em cada sentido, sentido crescente (via direita e esquerda) e sentido decrescente (via direita e esquerda), todas estas constam no anexo B (Tabela B.I).

Destaca-se ainda que, para as situações de pavimento molhado, e como referido anteriormente, considerou-se uma altura de água, h_w , próxima da recomendada para o ensaio de *Grip-Test* igual a 0,6 mm..

Como é possível verificar pela Figura 6.9 que apresenta as distâncias de travagem para um veículo sem ABS, as distâncias de travagem aumentam na via A, uma vez que esta apresenta um menor valor de GN em relação à via C.

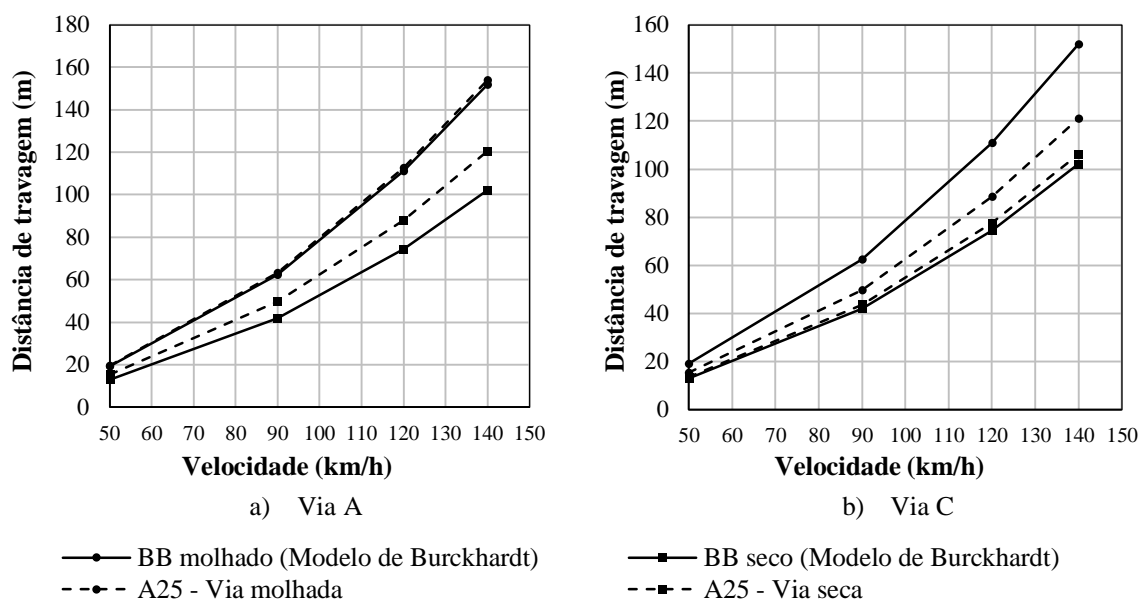


Figura 6.9. Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS no pavimento em BB

A Figura 6.10 realça as diferenças na distância de travagem num veículo com ABS que diminui em cerca de 26% a distância de travagem em pavimento molhado e cerca de 33% em pavimento seco, em relação aos veículos sem ABS. Verifica-se ainda que a via C apresenta menores distância de travagem pelas razões referidas anteriormente.

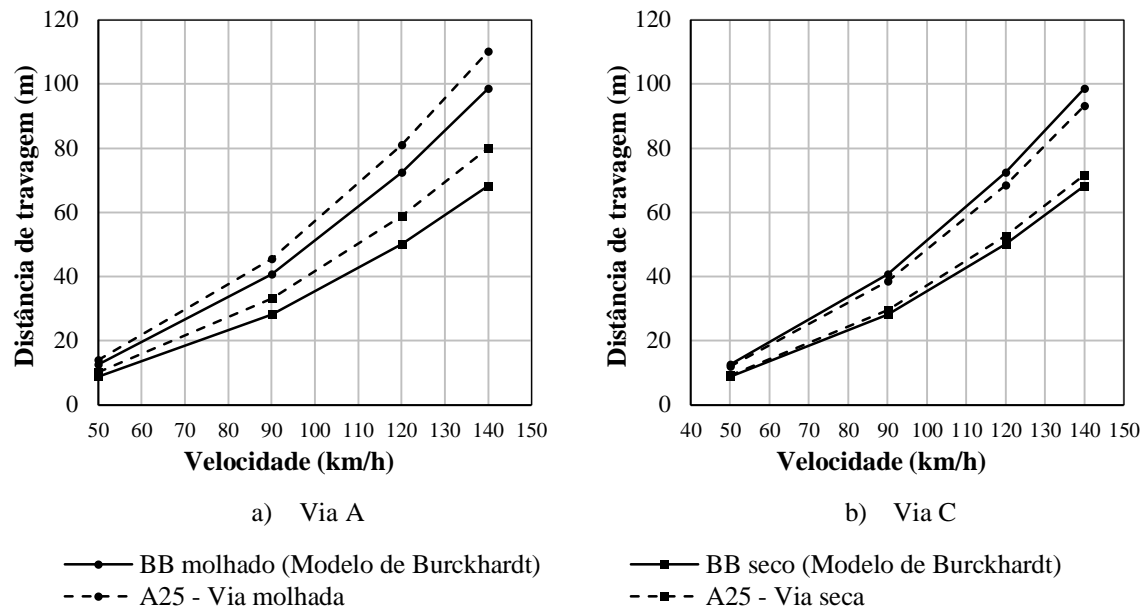


Figura 6.10. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS no pavimento em BB

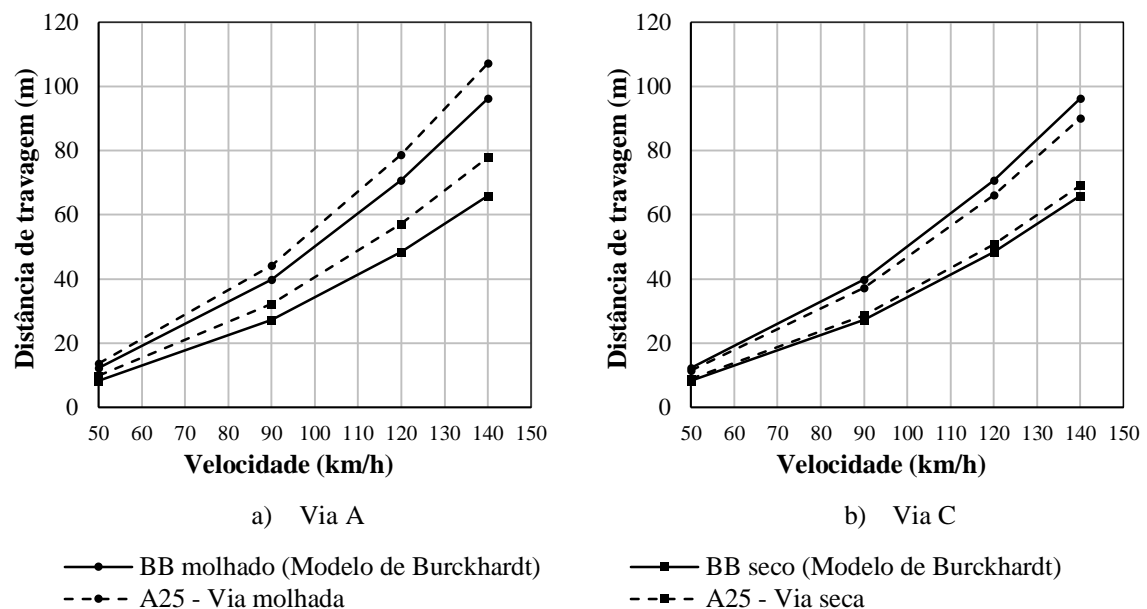


Figura 6.11. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado no pavimento em BB

Por último, a Figura 6.11 ilustra as distâncias de travagens nos veículos com ABS modificado que, em relação aos veículos sem ABS, são reduzidas em cerca de 28%, na

presença de água ($h_w=0,6$ mm) e em cerca de 35% em condições de pavimento seco ($h_w=0$ mm). Mais uma vez, o veículo com ABS apresenta um melhor comportamento no pavimento da via C, já que este apresenta as menores distâncias de travagem.

De um modo geral, as distâncias de travagem estão diretamente relacionadas com o menor ou maior valor de GN, uma vez que este tem uma grande influência nos parâmetros C_1 e C_3 das formulações propostas no capítulo 5.

Numa perspetiva comparativa com os valores obtidos pelo modelo de Burckhardt, os valores de distância de travagem obtidos pelo modelo de interação proposto aumentam, em média, 11% para condições secas e 21% em condições molhadas, o que permite afirmar que o modelo proposto é mais conservativo em relação a este tipo de pavimento betuminoso, principalmente quando molhado.

6.2.2. Betão betuminoso drenante

Neste tipo de pavimento betuminoso há uma diferenciação, ainda mais evidente, entre o modelo desenvolvido e o de Burckhardt pois, apesar deste último ter sido a base do desenvolvimento, o betão betuminoso drenante não é contemplado no modelo de Burckhardt. Na Figura 6.12 visualiza-se o comportamento destas curvas μ -s para os valores médios obtidos nos ensaios de caracterização (*Grip-Test* e Mancha de Areia) nas distintas condições (seco novo, molhado novo; seco velho e molhado velho) abordadas para este tipo de camada de desgaste.

Como já referido, teve-se em conta o fator idade do pavimento e as suas consequências, considerando-se, portanto os coeficientes da Tabela 6.2 para se proceder à análise das quatro condições distintas da via: novo seco; novo molhado; velho seco e velho molhado.

Tabela 6.2. Parâmetro k para o cálculo de coeficiente de permeabilidade e altura de água para betão betuminoso drenante

Parâmetros	Pavimento novo	Pavimento velho
k	1	1,3
h_w (altura de água) (mm)	0,02	0,6

De um modo geral, todas as curvas μ -s, expeto as curvas para pavimento velho molhado, têm um comportamento semelhante, consequência da característica de aderência deste tipo de pavimento. Por outro lado, a curva do pavimento drenante velho molhado apresenta-se abaixo da curva BB molhado do modelo de Burckhardt como consequência

da colmatção de vazios. Este facto terá consequências nos resultados das distâncias de travagem como se verá de seguida.

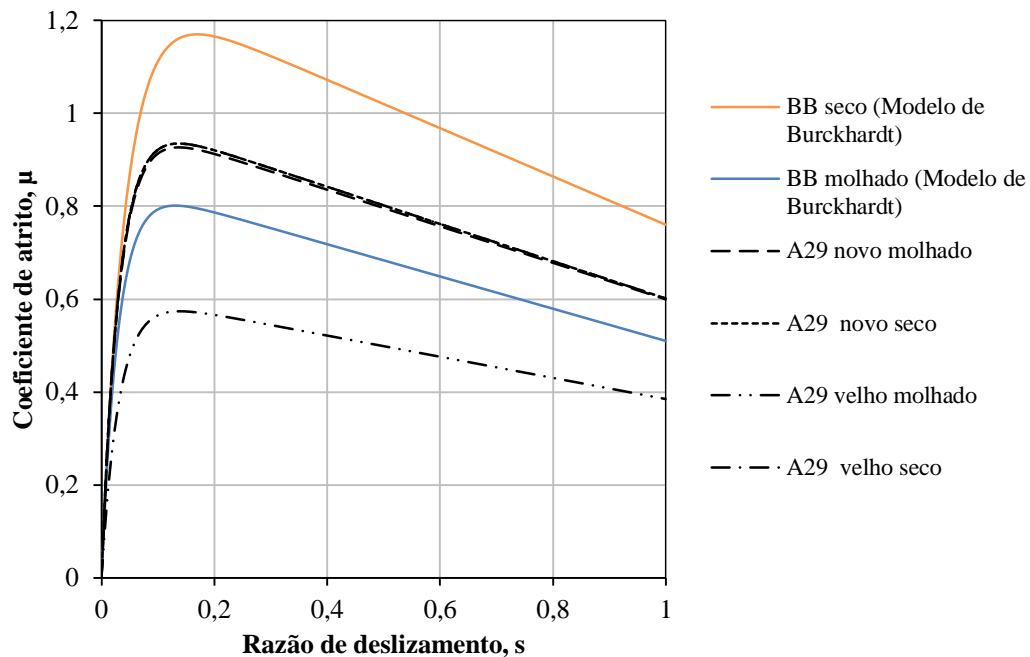


Figura 6.12. Curvas μ - s do modelo proposto para BBD e do modelo de Burckhardt

As distâncias de travagem obtidas para o betão betuminoso drenante (A29) encontram-se apresentadas no anexo B (Tabela B.II) para todas as vias (A, B, C e D), para os diferentes tipos de sistemas de travagem e distintas condições do piso. Neste subcapítulo apenas são apresentadas para duas vias da autoestrada em estudo, a via B correspondente à via da direita no sentido crescente e a via D correspondente à via da esquerda no sentido decrescente. Estas foram as vias seleccionadas de entre as quatro para uma análise mais aprofundada pois a via B possui valor máximo de GN e elevado valor de MTD (não o maior) e a via D apresenta valor mínimo de GN e mínimo de MTD (Tabela 5.2).

Para o cálculo das percentagens apresentadas neste subcapítulo, à semelhança do anterior, foram também tomadas em consideração os valores dos ensaios das quatro vias desta autoestrada.

A Figura 6.13 apresenta as distâncias de travagem determinadas pelo modelo de Burckhardt e pelo modelo de interação pneu-pavimento desenvolvido, para um veículo sem ABS, nas quatro condições em estudo, de modo a tornar a interpretação dos resultados obtidos mais simples.

A via D apresenta maior distância de travagem em condições molhadas e com vários anos de serviço, em comparação com a via B nas mesmas condições, isto ocorre devido à diferença, desde da fase de entrada em serviço, do valor de GN e de MTD.

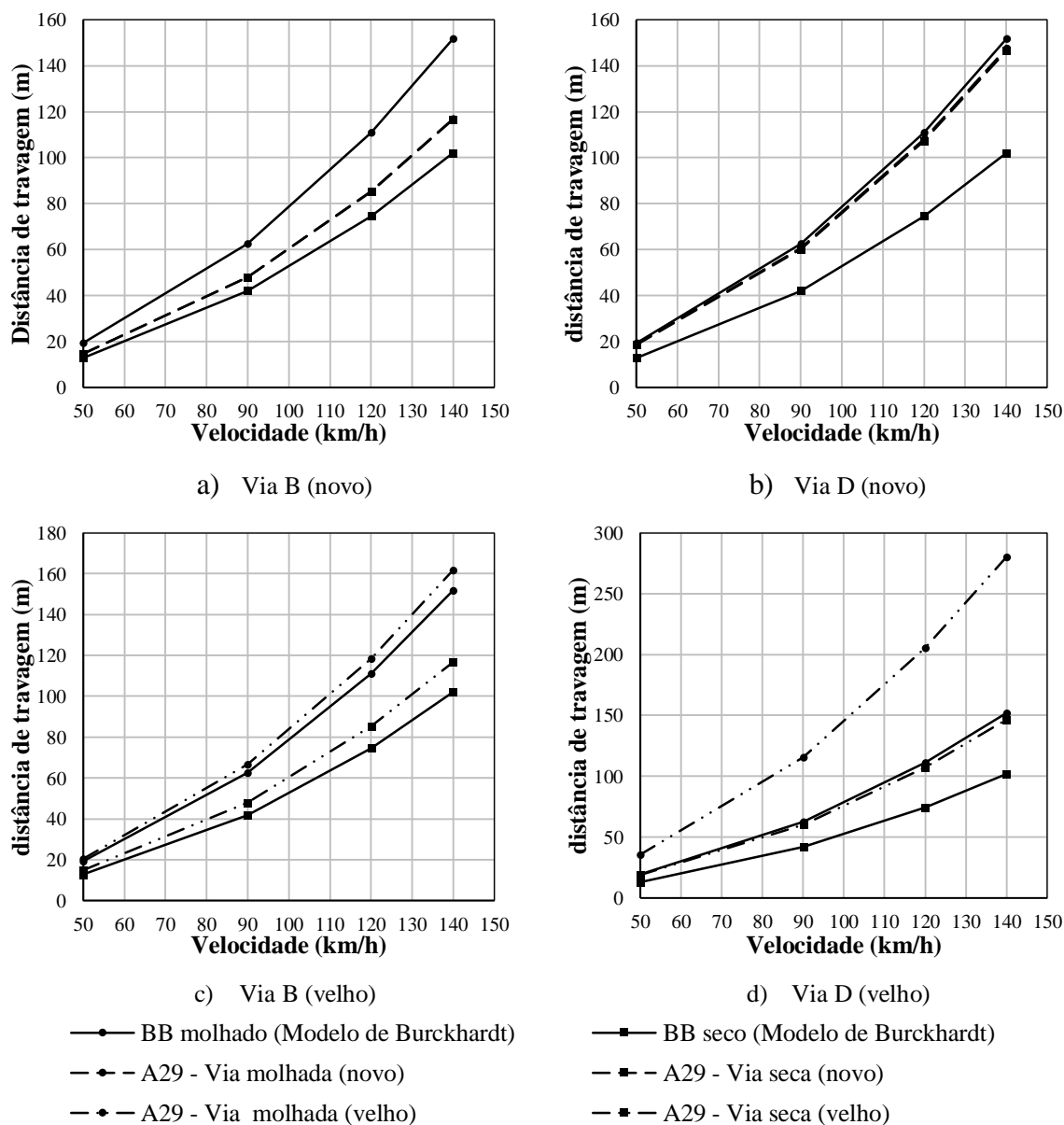


Figura 6.13. Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS no pavimento em BBD

Em condições de novo (seco e molhado) e velho seco os valores de distância de travagem são mais próximos e, também muito semelhantes em cada via, sendo impercetível a visualização das diferenças principalmente nos gráficos da Figura 6.13 a) e b) devido à proximidade dos seus valores em cada uma das velocidades.

No caso de estarem em condições secas ($h_w = 0$), o valor é, em ambas as situações (novo e velho), igual. No caso do pavimento novo estar molhado, o valor de distância de

travagem aumenta cerca de 0,7% na via D (igual na via A) em relação às condições de pavimento seco, porém na via B (igual na via C), o valor aumenta de forma menos significativa, apenas 0,1%. Esta diferenciação pode ser explicada pelos baixos valores de GN e MTD na via D. Pode também verificar-se que estes aumentos são praticamente nulos, o que indica que a camada de desgaste em BBD molhado, no início de vida útil, tem propriedades de aderência próximas do BBD novo e seco.

Em relação às distâncias de travagem em pavimento molhado velho, os valores aumentam cerca 83% no caso da via D (igual em A) e cerca de 40% na via B (igual a C), comparativamente à distância de travagem em pavimento seco, mais uma vez devido ao valor de GN na via B ser superior.

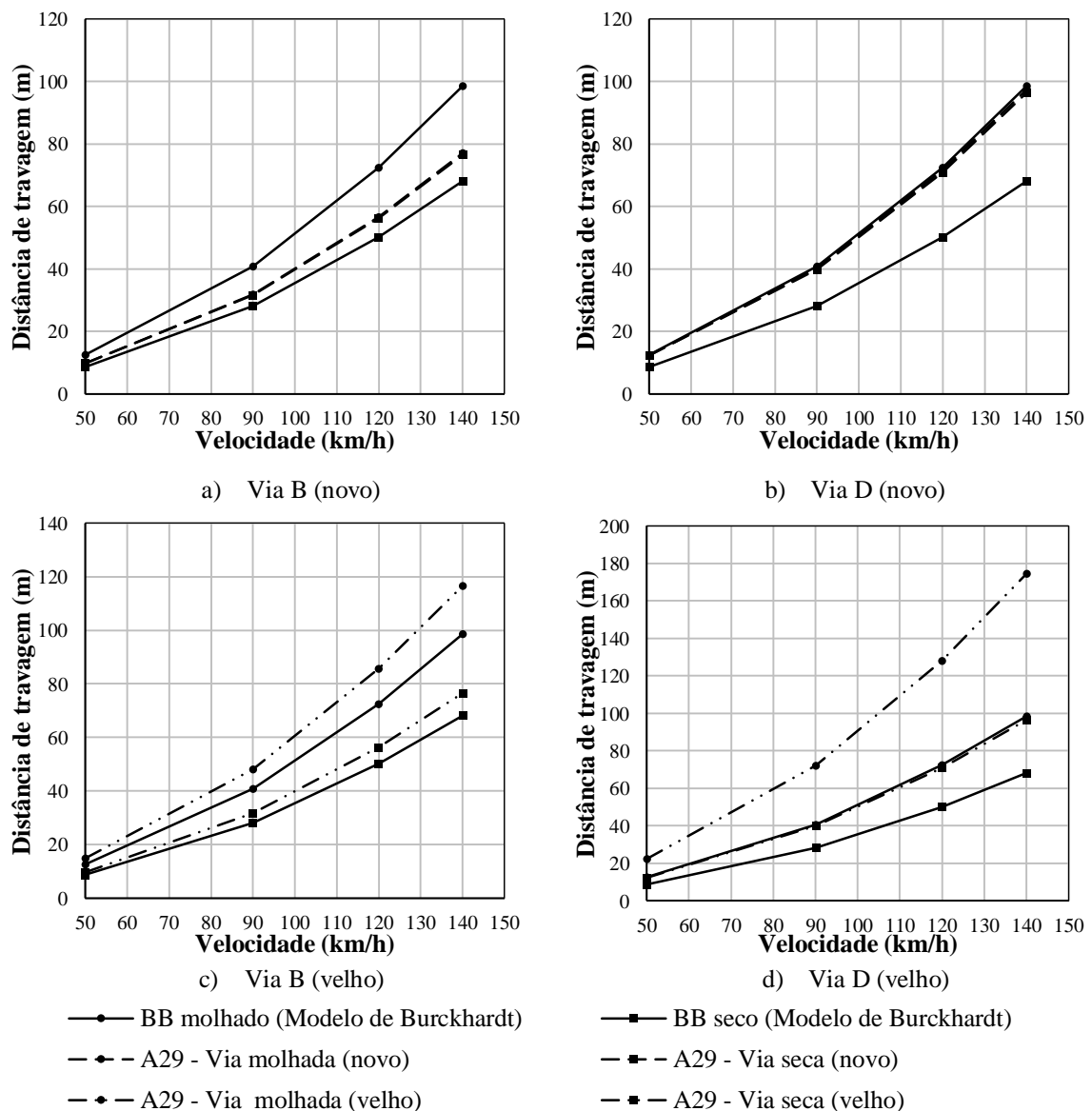


Figura 6.14. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS no pavimento em BBD

A Figura 6.14 apresenta, para as duas vias, as distâncias de travagem para o veículo com ABS, verificando-se, uma vez mais, que essa distância é maior para a via D.

De igual modo, as distâncias de travagem em condições de novo (seco e molhado) e velho seco assumem valores próximos e, também muito semelhante em cada via em análise sendo impercetível a diferenciação nos gráficos da Figura 6.14 a) e b) (pavimento novo molhado e novo seco), devido à proximidade dos seus valores em cada uma das velocidades em análise. No caso de estarem em condições secas ($h_w = 0\text{ mm}$), o valor é igual em ambas as situações (novo e velho). No caso de o pavimento novo estar molhado, $h_w = 0,02\text{ mm}$, o valor de distância de travagem aumenta cerca de 0,8% em relação às condições de pavimento seco, na via B (igual na via C), porém na via D (igual na via A), este valor aumenta aproximadamente 1%, o que indica que as vias que possuem maiores GN não aumentam tanto a distância de travagem entre pavimento seco novo e molhado novo como os pavimentos que possuem valores mais baixos de GN.

Mais ainda, as distâncias de travagem em condições de pavimento velho molhado assumem valores muito elevados, no caso dos veículos com ABS, o valor aumenta cerca de 76,5% em relação ao pavimento seco (independente da condições de novo ou velho) na via D (igual em A) e na via B (igual a C) aumenta cerca de 53% mostrando que a distância de travagem aumenta para as vias em que o GN assume valores menores.

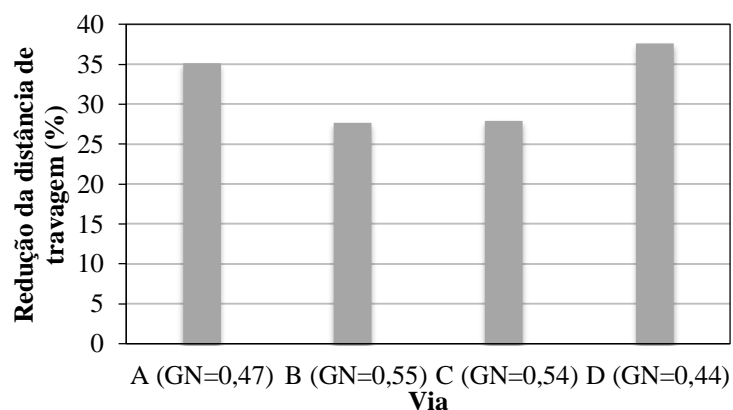


Figura 6.15. Redução da distância de travagem entre o veículo sem ABS e com ABS no pavimento velho molhado

As reduções das distâncias de travagem devido ao sistema de ABS nos pavimentos velhos molhados, estão representadas na Figura 6.15, onde se verifica que nas vias em que o GN é elevado (via B e C) há uma redução de cerca de 27,8% e de 36,4% quando GN apresenta valores mais baixos (A e D), isto ocorre pois a distância de travagem para

veículos sem ABS já é favorecidas pelo elevado GN, deste modo, a aplicação do sistema de ABS é mais notória nas vias com menor GN.

Por outro lado, já em condições de piso seco novo, seco velho e novo molhado, há uma redução de aproximadamente 34% das distâncias de travagem quando comparado com as obtidas nos veículos sem ABS.

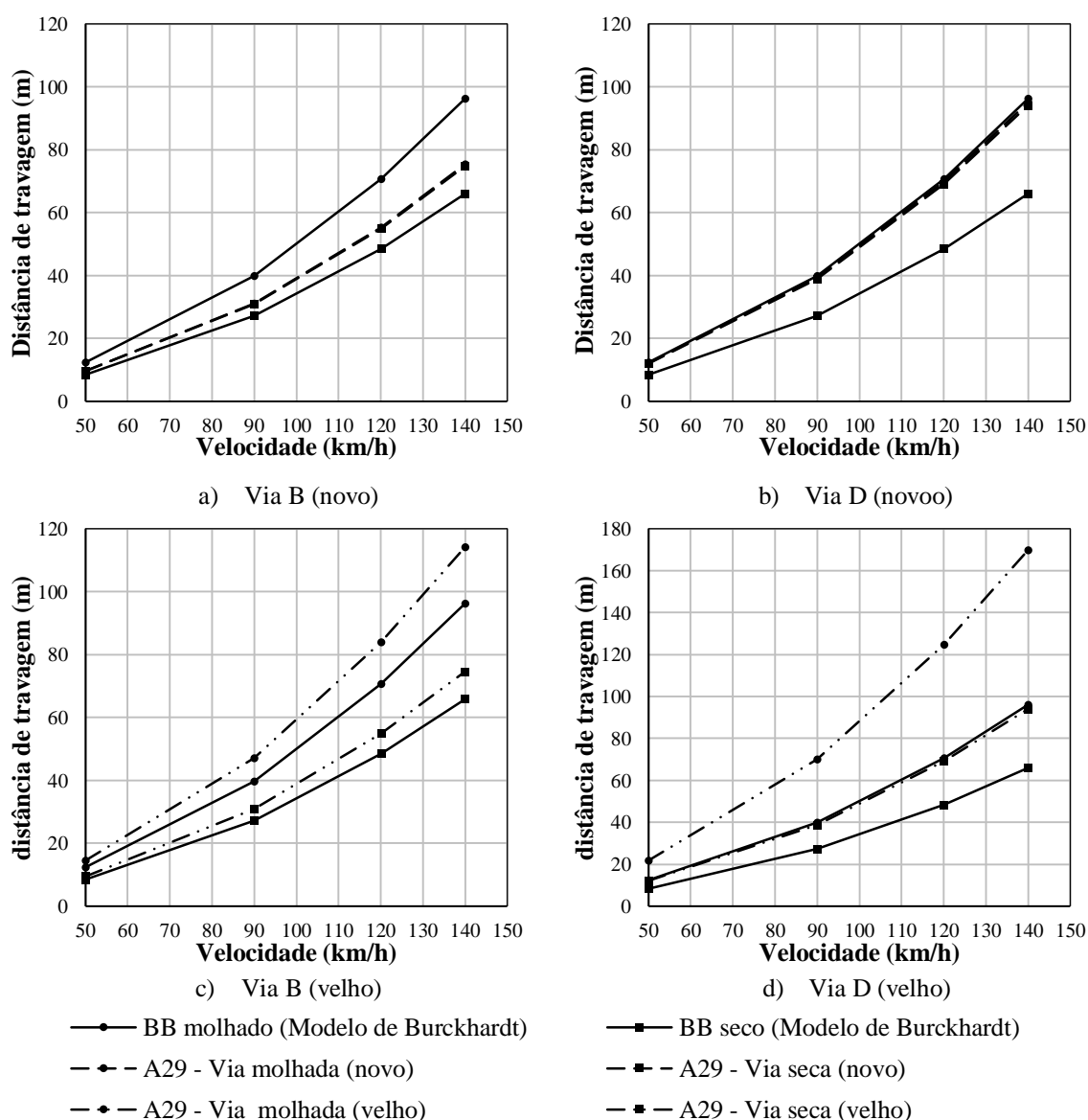


Figura 6.16. Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado no pavimento em BBD

No veículo com ABS modificado (Figura 6.16), também se verifica que as distâncias de travagem em condições de novo seco e velho seco são iguais (Figura 6.16 a) e b)) e que nas condições secas mas com anos de serviço assumem valores muito próximos aos anteriores em cada velocidade em análise. Quando o pavimento novo se encontra

molhado, $h_w=0,02$ mm, a distância de travagem aumenta cerca de 0,9% , no caso das vias com maior GN (via B e C) e aproximadamente 1,1% nas vias em que GN apresenta valor inferior (via A e D).

Mais uma vez, as distâncias de travagem no pavimento molhado velho manifestam-se com valores elevados comparativamente com as distâncias de pavimento novo e velho seco. Em relação ao pavimento seco, a distância de travagem do pavimento velho molhado aumenta 54% na via B (igual a C) e 76% na via D (igual a A).

A Figura 6.17 apresenta as reduções das distâncias de travagem para veículos com ABS modificado em relação aos veículos sem ABS para pavimento velho molhado. Nas vias com GN elevado (via B e C) há uma redução de cerca de 29,4% e de 38% quando GN possui valores mais baixos (via A e D), isto ocorre pois, a eficácia do sistema ABS é mais notória nas vias com piores características de aderência.

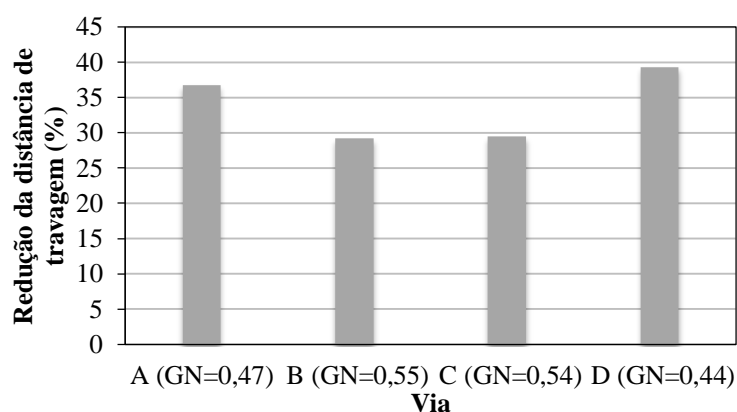


Figura 6.17. Redução da distância de travagem entre o veículo sem ABS e com ABS modificado no pavimento velho molhado

Nas vias consideradas como novas secas, velhas secas e novas molhadas a redução nos primeiros casos é de 36% e no segundo de 35% em relação aos sistemas de travagem tradicionais.

Para todos os sistemas de travagem em análise, o modelo de Burckhardt, neste tipo de pavimento, assume-se conservativo apenas para condições de novo molhado, com uma diminuição de cerca de 30,4% da distância de travagem, ou seja, as distâncias de travagem obtidas pela formulação proposta neste trabalho, diminuem em relação às obtidos pela formulação de Burckhardt para BB molhado. Em pavimento novo seco, há um aumento médio de 26,4% no modelo proposto, já em pavimento “velho” molhado aumenta em média 42,6%.

6.3. Norma de traçado

Na concepção das vias deve-se garantir as condições de visibilidade satisfatórias para que ao surgir um obstáculo inesperado, o veículo possa parar de uma forma segura. Este fator é tido em consideração na elaboração do projeto geométrico por meio do cálculo da distância de visibilidade de paragem.

A Figura 6.18 apresenta as distâncias de travagem tomadas em consideração pelo projetista conforme norma em vigor e as calculadas no subcapítulo 6.2 para a camada de betão betuminoso denso. Os valores de projeto são superiores tanto para veículos sem ABS como para veículos com ABS e com ABS modificado nas vias independentemente, neste caso, das melhores (seca) ou piores (molhada com $h_w = 0,6$ mm) características superficiais do pavimento, facto também mostrado no anexo B (Tabela B.III).

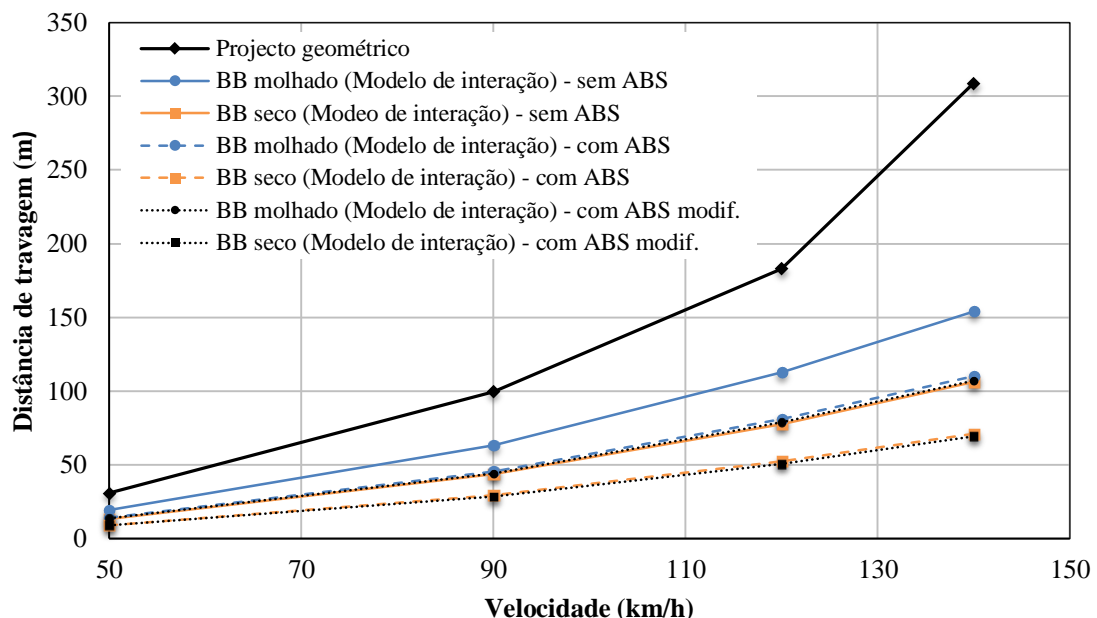


Figura 6.18. Distância de travagem em função da velocidade do veículo segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para pavimento em BB

Os valores de coeficiente de atrito, μ_p (Tabela 3.5) revelam-se conservativos em relação aos valores calculados neste estudo para o betão betuminoso denso inclusive nas situações mais desfavoráveis das vias deste estudo (Via A). A Figura 6.19, Figura 6.20, Figura 6.21 e Figura 6.22 representam as distâncias de travagens calculadas segundo o modelo de interação pneu-pavimento proposto, o modelo de Burckhardt e segundo a norma de traçado em vigor em Portugal, para os três sistemas de travagem em análise e diferentes velocidades.

A distribuição das distâncias de travagem nos gráficos seguintes é idêntica nas diferentes velocidades de circulação do veículo, notando-se um aumento da distância de travagem com a velocidade. E mais uma vez se verifica que a menor distância de travagem ocorre para condições secas do pavimento e com um veículo que possui ABS modificado.

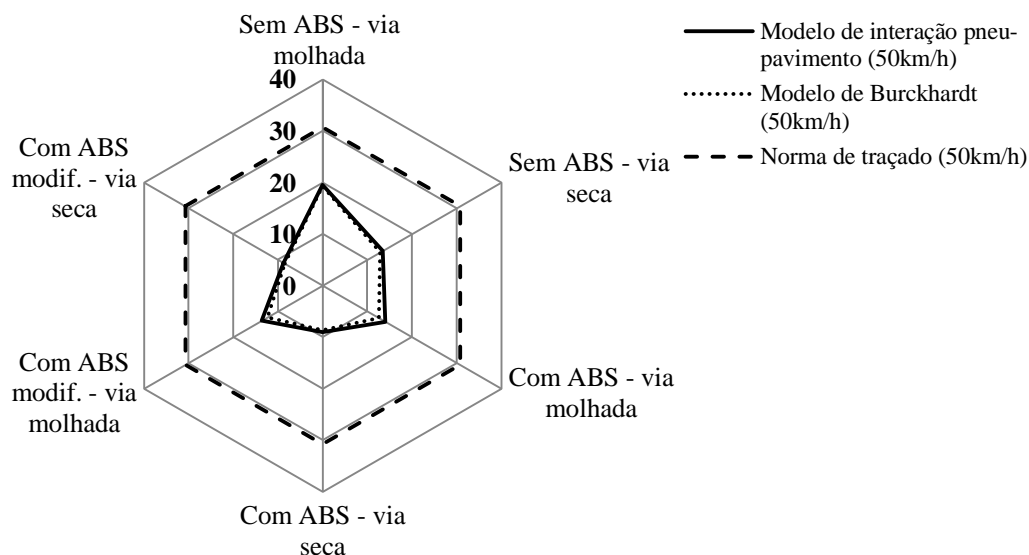


Figura 6.19. Distâncias de travagem em BB para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 50 km/h e condições do pavimento (seco e molhado)

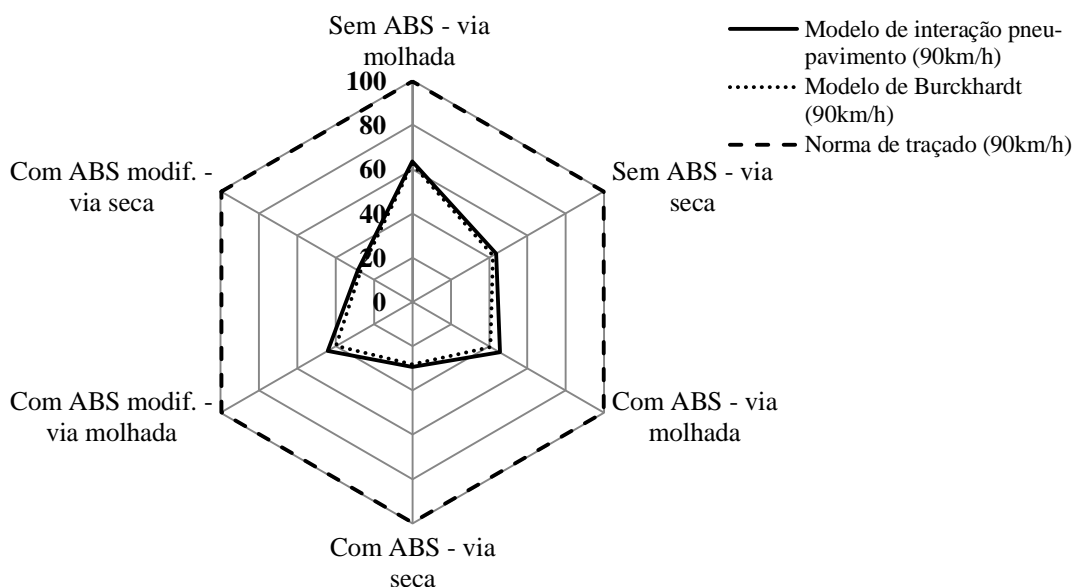


Figura 6.20. Distâncias de travagem em BB para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 90 km/h e condições do pavimento (seco e molhado)

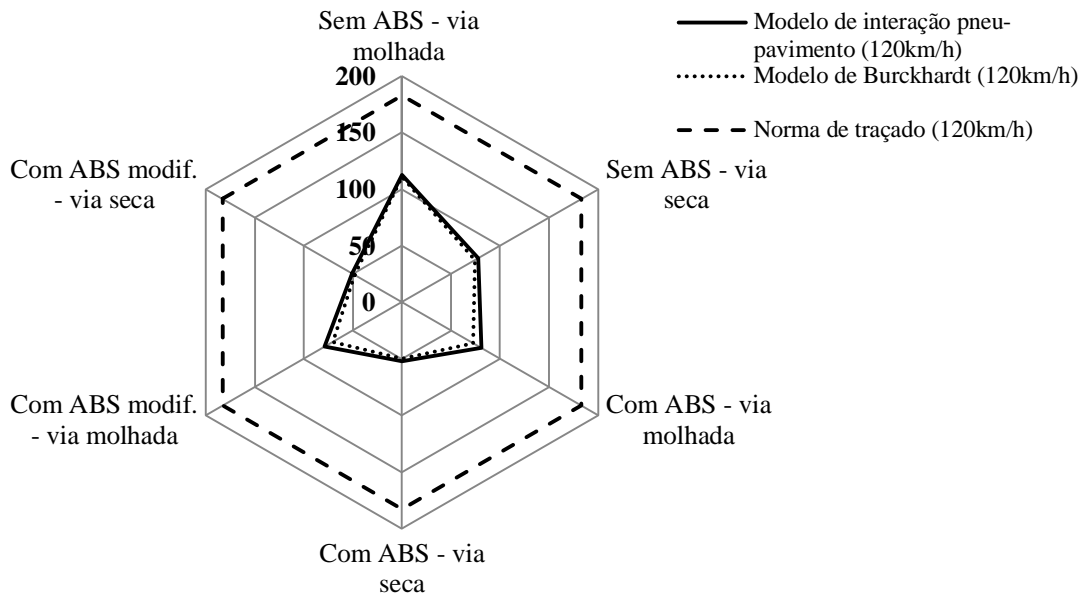


Figura 6.21. Distâncias de travagem em BB para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 120 km/h e condições do pavimento (seco e molhado)

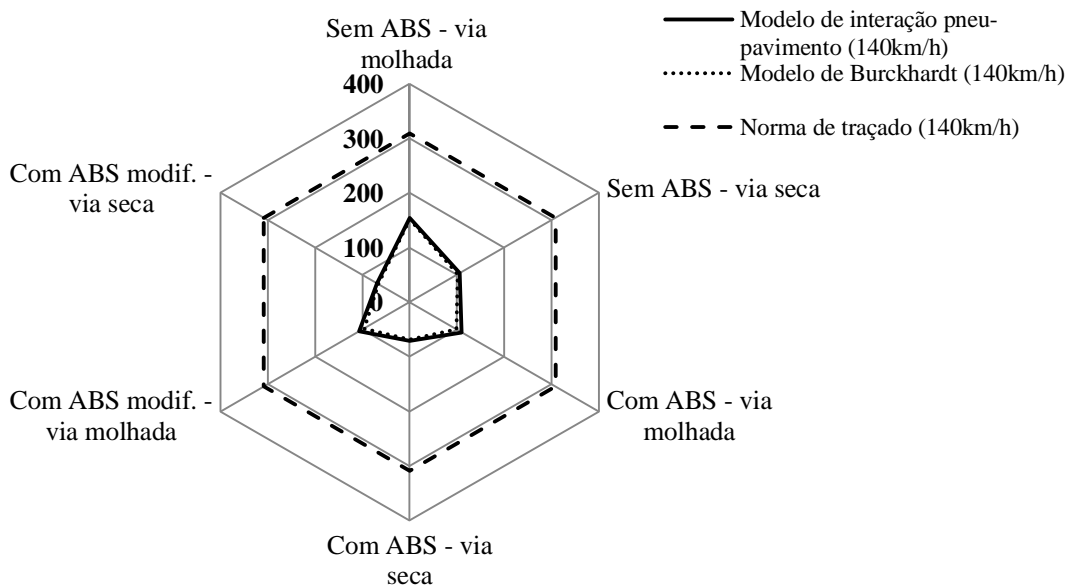


Figura 6.22. Distâncias de travagem em BB para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 140 km/h e condições do pavimento (seco e molhado)

Quanto à análise das figuras anteriores é visível a proximidade entre o modelo proposto e o modelo de Burckhardt, uma vez que este último foi a base do desenvolvimento do modelo de interação apresentado neste estudo.

Também, deve ter-se em conta que as análises das distâncias de travagem foram realizadas considerando uma altura de água de 0,6 mm, situação que na verdade, não corresponde ao estado hídrico da superfície mais gravoso. Por isso, revela-se aqui a

vantagem da utilização do modelo de interação proposto, que possibilita o cálculo das diferentes distâncias de travagem conforme a altura de água do pavimento. A maior quantidade de água existente no pavimento irá provocar a deslocação das curvas do “Modelo de interação pneu-pavimento” para uma zona mais próxima da curva da norma de traçado. Este facto também poderá ocorrer com a diminuição dos valores dos ensaios de *Grip-Test* e de Mancha de Areia.

Na Figura 6.23 estão representadas as distâncias de travagem a considerar em projeto e as distâncias determinadas para betão betuminoso drenante segundo o modelo proposto nas condições hídricas assumidas ($h_{wvelho}=0,6$ mm e $h_{wseco}=0$ mm) e condições de estado ($k_{novo}=1$ e $k_{velho}=1,3$). Neste caso, as situações com ABS, com ABS modificado e sem ABS em pavimento seco apresentam valores inferiores aos de projeto, porém em situação de pavimento molhado e já com alguns anos de serviço, o valor é superior ao do projeto até a uma velocidade de aproximadamente 130km/h, a partir desta verifica-se, mais uma vez, a conservação do valor do coeficiente de atrito em projetos.

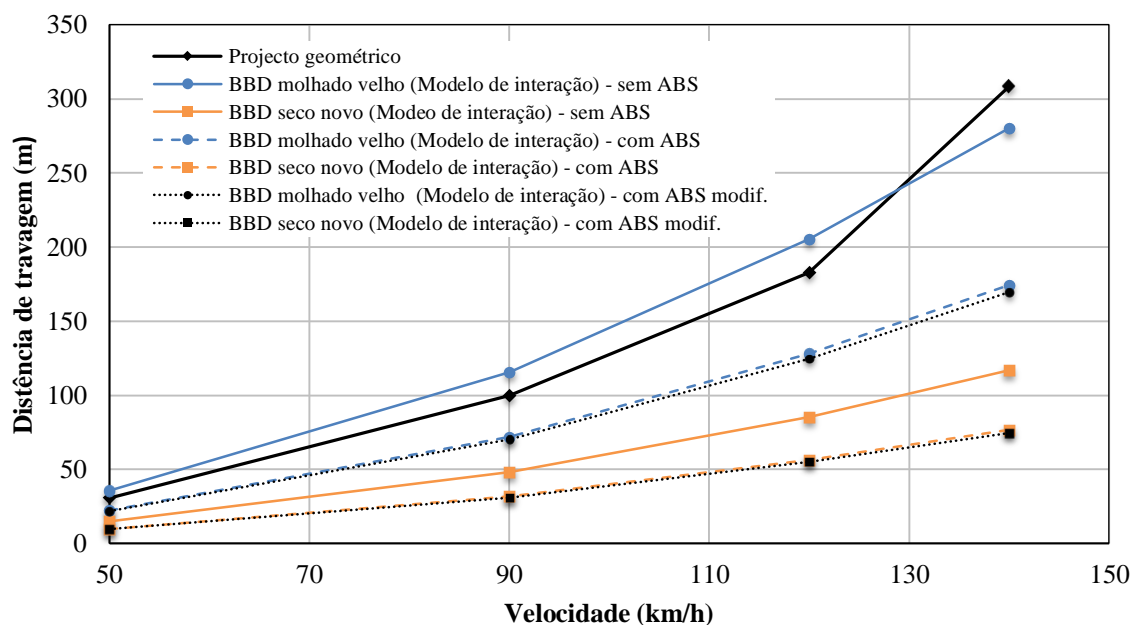


Figura 6.23. Distância de travagem em função da velocidade do veículo segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para pavimento em BBD

As Figura 6.24, Figura 6.25, Figura 6.26 e Figura 6.27 ilustram, esquematicamente, a variação das distâncias de travagem conforme a aplicação das três metodologias (modelo de interação, modelo de Burckhardt e norma do traçado) nos diferentes sistemas de travagem do veículo e com a variação da velocidade onde é visível verificar, mais uma vez, que a menor distância ocorre nos pavimentos novos secos para veículos com ABS

modificado e as maiores para veículos sem ABS, em pavimentos molhados e com alguns anos de serviço, sendo este valor até superior ao valor admitido em projeto (Figura 6.24, Figura 6.25 e Figura 6.26).

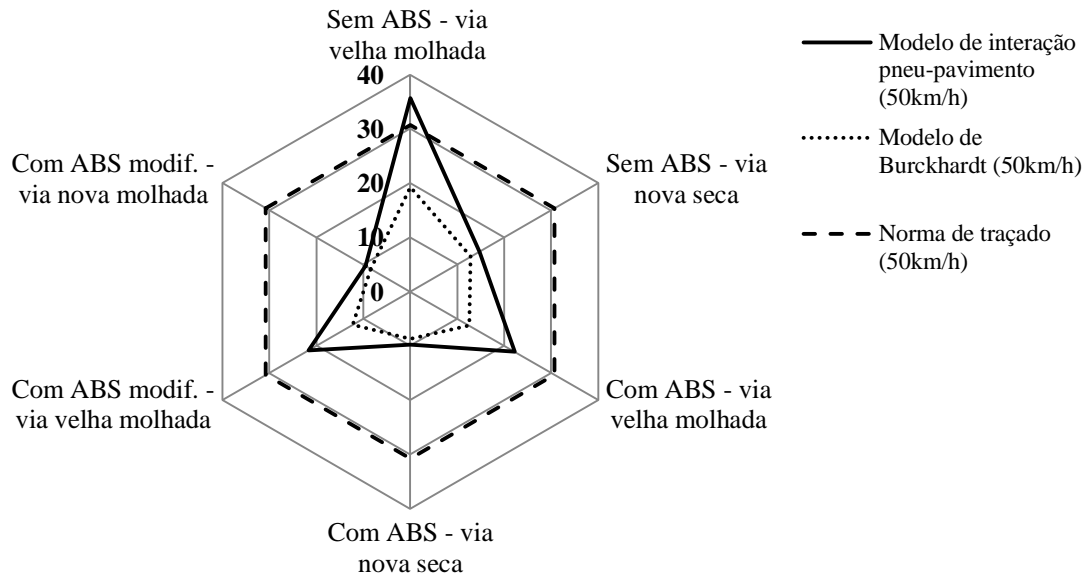


Figura 6.24. Distâncias de travagem em BBD para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 50 km/h e condições do pavimento (novo seco e velho molhado)

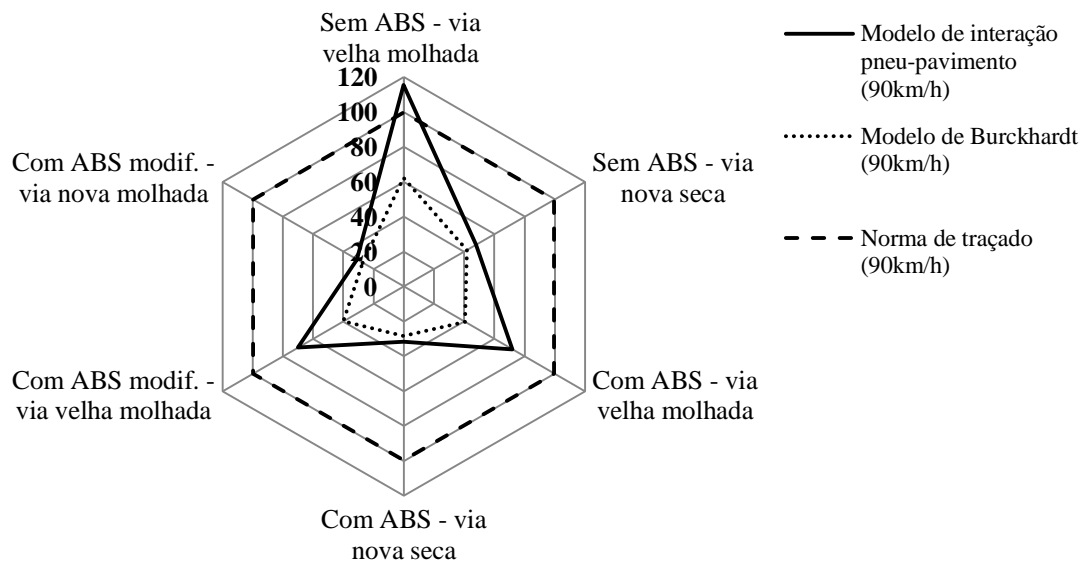


Figura 6.25. Distâncias de travagem em BBD para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 90 km/h e condições do pavimento (novo seco e velho molhado)

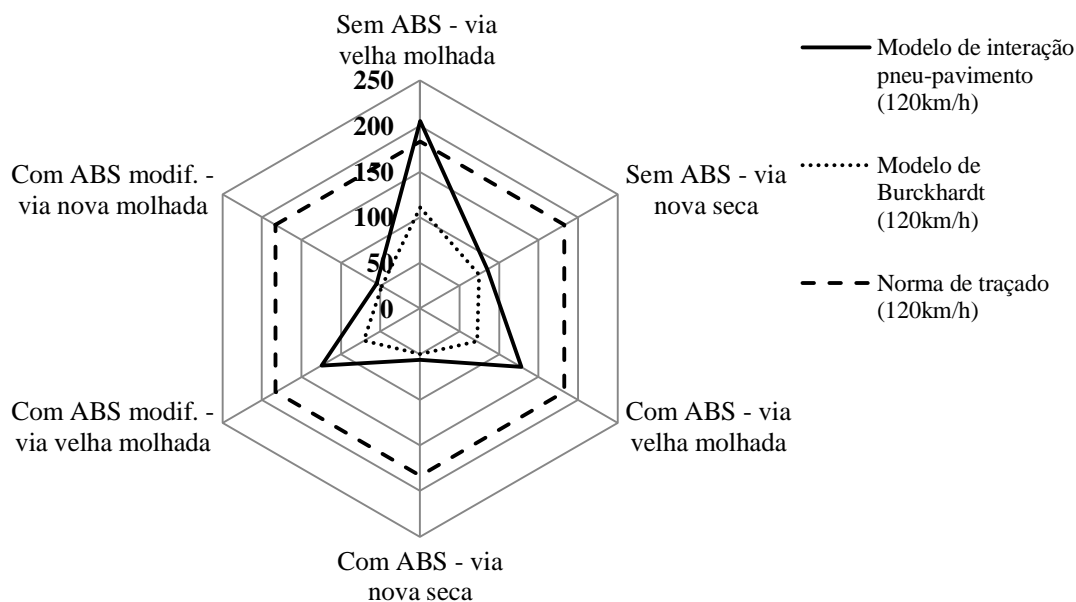


Figura 6.26. Distâncias de travagem em BBD para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 120 km/h e condições do pavimento (novo seco e velho molhado)

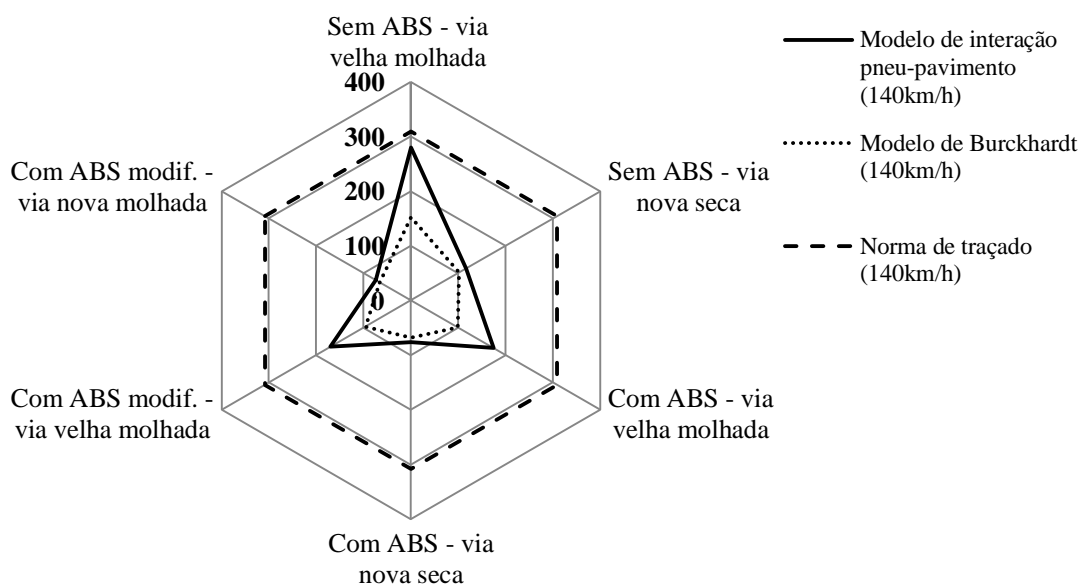


Figura 6.27. Distâncias de travagem em BBD para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes veículos a 140 km/h e condições do pavimento (novo seco e velho molhado)

Neste tipo de pavimento verifica-se o distanciamento entre o modelo proposto e o de Burckhardt, pois neste último não constam os parâmetros aplicados quando o pavimento betuminoso é do tipo drenante e, portanto o modelo de interação pneu-pavimento tenta ultrapassar essa limitação. Na Figura 6.27, as distâncias do modelo proposto, para uma altura de água no pavimento de 0,6 mm, revelam-se inferiores à da norma mostrando que

esta pressupõe elevadas distâncias de travagem para altas velocidades, assegurando assim projetos de estradas mais seguros quando a velocidade base de projeto é 140 km/h.

Mais uma vez, torna-se importante salientar que as curvas traçadas para o “Modelo de interação pneu – pavimento” tomam em consideração os valores das variáveis assumidas ao longo desta dissertação, revelando-se um único modelo adaptável às condições de cada tipo de pavimento em estudo. Deste modo, a curva do modelo é alterável para diferentes alturas de água, diferentes valores de GN e de Mancha de Areia.

Em síntese, o modelo proposto é agora comparado com o modelo de Burckhardt, base do estudo desenvolvido, e o proposto por Pacejka (fórmula mágica) descrito no subcapítulo 4.4. Estes últimos foram concebidos com o principal objetivo de caracterizar a interação pneu-pavimento, no entanto dependentes exclusivamente de dados do veículo-teste. A formulação apresentada centra-se na consideração das características reais de qualquer tipo de pavimento betuminoso em que o veículo circule. A Figura 6.28 ilustra os diferentes modelos referidos anteriormente.

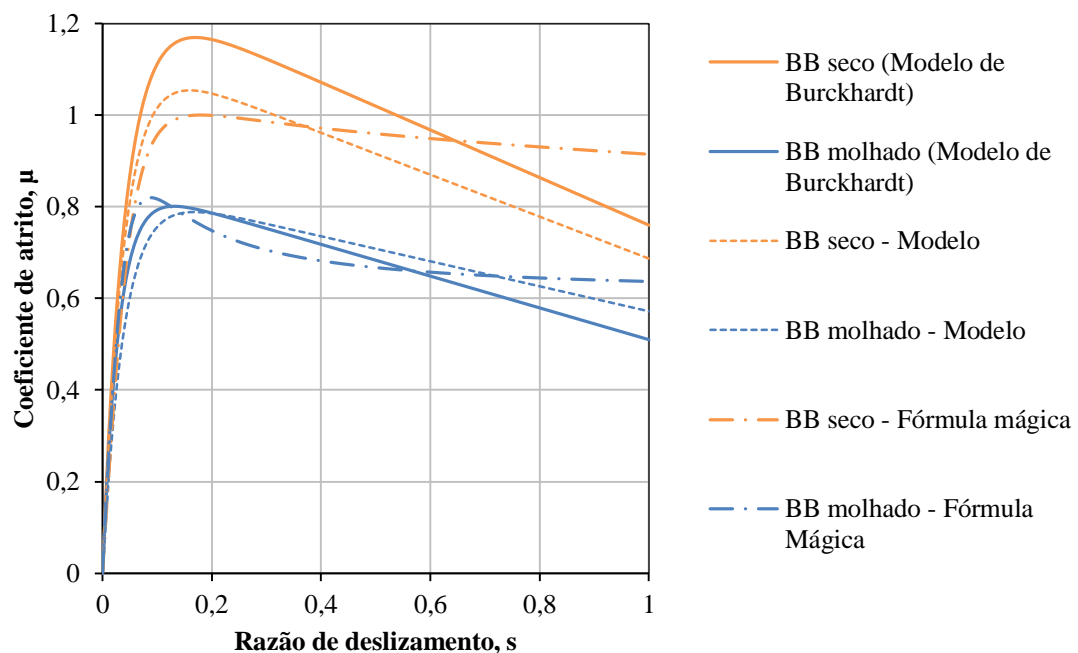


Figura 6.28. Curvas μ - s do modelo de interação pneu-pavimento proposto, do modelo de Burckhardt e da fórmula mágica

De um modo geral, é visível a semelhança dos comportamentos das curvas nas mesmas condições (secas ou molhadas) principalmente entre o modelo de Burckhardt e o modelo proposto neste estudo, uma vez que o segundo foi concebido a partir dos mesmos pressupostos do primeiro, mas pela via da incorporação de valores característicos da

superfície do pavimento, o que em termos reais, considerada a enorme diversidade de pavimentos betuminosos possíveis, se traduz numa abordagem muito mais interessante. O modelo de Pacejka distingue-se um pouco mais pela sua complexidade dependendo de outros fatores apontados no subcapítulo 4.4.

As distâncias de travagem calculadas pelos três modelos são distintas, indicando a infinidade de relações que poderão ser assumidas para estabelecer formulações que representem dignamente a interação pneu-pavimento. No entanto, tal interação é certamente dependente das características superficiais dos pavimento que apenas o modelo de interação desenvolvido nesta dissertação, toma em consideração. Este modelo revela-se, portanto um progresso no estudo do contacto entre os veículos e as exigidas características superficiais no decorrer das obras de rodovias, assim como no contacto entre ambos na presença de água.

Capítulo 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7. Considerações finais

Partindo de um dos objetivos desta dissertação que consistia no desenvolvimento de um modelo de interação pneu-pavimento em função das características das camadas superficiais dos pavimentos rodoviários, neste capítulo serão discutidos, de uma forma geral, os principais resultados, assim como apontadas as conclusões deste estudo e perspectivas futuras.

7.1. Conclusões

O atrito é influenciado por um grande número de parâmetros relacionados com a estrada e com o pneu mas, também é afetado por outros fatores externos, tais como a presença de água, a suspensão do veículo, as condições ambientais, a presença de contaminantes e a velocidade do veículo. Este parâmetro, assim como a textura do pavimento são cruciais na caracterização superficial dos pavimentos rodoviários, tendo sido fatores determinantes para o desenvolvimento do modelo de interação.

Através deste estudo conclui-se que os modelos de interação veículo-pavimento devem estar relacionados com as características superficiais da camada de desgaste, apresentando-se uma proposta dessa dependência através das equações apresentadas no subcapítulo 5.1 para cada um dos tipos de pavimento em análise (betão betuminoso denso e betão betuminoso drenante), deste modo, torna-se mais realista a relação entre o pavimento e o veículo.

O coeficiente de atrito máximo e a relação de deslizamento correspondente dos modelos que os sistemas de travagem (sistema ABS e sistema ABS modificado) incorporam são cruciais para melhorar a otimização das suas funções, da mesma forma, quanto mais representativo da realidade for o modelo maior eficácia o sistema irá ter.

O sistema de ABS modificado apresentado nesta dissertação surge como um sistema de elevado potencial que permite melhorar a qualidade do controlo do sistema de travagem tomando em conta a tipologia e condições da estrada. A identificação em tempo real permite aos sistemas de controlo e de anti-colisão melhorar a eficácia e as distâncias de travagem. Pelos resultados obtidos, verifica-se que este sistema garante as menores distâncias de travagem mesmo que, em alguns casos, essa diminuição seja de poucos metros em relação aos veículos com ABS.

Em relação às distâncias de travagem calculadas, existe uma distinção no valor das calculadas pelo modelo de Burckhardt e das calculas pelo modelo desenvolvido, facto explicado pela diversidade de variáveis (altura de água, GN e MTD) que este último toma em consideração, por outro lado, o primeiro apenas se baseia em resultados experimentais de veículos-teste (Tabela 7.1). Deste modo, os fatores dependentes dos pavimentos não podem, de maneira alguma, serem excluídos da formulação dos modelos matemáticos presentes nos sistemas de segurança ativa, facto que, nos modelos mais utilizados pelos sistemas de travagem não se verifica, como apresentado na Tabela 7.1.

Tabela 7.1. Variáveis nos diferentes modelos para determinação do coeficiente de atrito

Modelo/Norma	Variáveis
Modelo de interação pneu-pavimento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de pavimento betuminoso (denso ou drenante); ▪ Mancha de Areia, MTD; ▪ <i>Grip-Test</i>, GN; ▪ Altura de água h_w; ▪ Grau de saturação, γ; ▪ Coeficiente dependente da permeabilidade, λ; ▪ Deslizamento da roda, s.
Modelo de Burckhardt	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de pavimento e estado (seco ou molhado); ▪ Deslizamento do pneu, s
Fórmula mágica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de pavimento e estado (seco ou molhado); ▪ Deslizamento do pneu, s
Norma de traçado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Velocidade admitida no projeto, V.

Nos pavimentos com camada de desgaste em betão betuminoso denso, as distâncias de travagem são maiores nas vias da direita pois apresentam menores valores de GN e menores nas vias da esquerda. Por outro lado, quando o pavimento apresenta a camada de desgaste em betão betuminoso drenante, as vias da direita apresentam uma menor distância de travagem pois, neste caso, o valor de GN é superior ao das vias da esquerda o que faz supor que as vias da direita possuem uma idade inferior, consequência por exemplo de uma intervenção.

O pavimento em betão betuminoso drenante velho, em condições molhadas, apresenta, em todas as vias estudadas, nas diferentes velocidades e para os diferentes sistemas de travagem, as maiores distâncias de travagem, consequência da perda de permeabilidade do pavimento ao longo do tempo, neste trabalho considerado pelo coeficiente, λ .

A norma de traçado em vigor em Portugal constitui a base dos projetos das vias de comunicação rodoviárias e está de acordo com a evolução tecnológica, no entanto, os coeficientes de atrito admitidos, μ_p , dependentes do valor de velocidade base do projeto (Tabela 7.1), são muito minorizados em relação aos valores determinados pelo modelo desenvolvido que tem em conta as características da macro e microtextura, as condições hídricas e o tipo de camada de desgaste em que o veículo circula (BB e BBD). Apesar de se admitir na norma de traçado valores baixos de coeficiente de atrito para abranger todos os sistemas de travagem e todas as condições pavimento (idade, estado hídrico, presença de contaminante, entre outras), uma grande parte dos veículos estão equipados com ABS o que possibilita que a travagem ocorra para elevados níveis de coeficiente de atrito entre o pneu e pavimento e, consequentemente uma diminuição das distâncias de paragem.

Com este estudo é possível também concluir que a norma de traçado em vigor, que tem como objetivo garantir as melhores condições de segurança e comodidade aos utentes, poderá determinar os coeficientes de atrito em projeto através das características superficiais que pretende garantir (valor de GN e de MTD) num determinado tipo de pavimento (BB e BBD), para determinadas alturas de água, dependente também do sistema de travagem dos veículos previstos de circular na estrada a projetar.

Ao longo deste trabalho também surgiram muitos desafios, desde a introdução em matérias geralmente fora do escopo da Engenharia Civil, até ao elevado número de análises desenvolvidas, das quais aqui são apresentadas apenas uma seleção entre as que se revelaram mais consistentes, passando por problemas na análise dos resultados recolhidos na bibliografia muito heterogénea que nem sempre referiam os mesmos ensaios.

Em suma, este trabalho foca a necessidade da considerar as características superficiais dos pavimentos betuminosos, no desenvolvimento de sistemas mais eficientes de travagem dos veículos. Esta avaliação revelar-se-á tanto mais útil quanto maior o número de parâmetros se tiver em consideração (altura de água, valor de *Grip-Test*, valor do ensaio de Mancha de

Areia), ao mesmo tempo que se torna mais próxima do fenómeno de travagem descrito na realidade pelos veículos que circulam nos diferentes tipos de pavimento.

7.2. Perspetivas futuras

O trabalho desenvolvido permite agora experimentação prática, ou seja, é necessário avaliar os coeficientes de atrito pneu-pavimento em pavimentos betuminosos iguais aos estudados (densos e drenantes) e afinar as equações propostas para os parâmetros C_1 , C_2 e C_3 .

Propõe-se, ainda o desenvolvimento de expressões, incorporadas na metodologia desenvolvida, para outros tipos de camada de desgaste designadamente betão betuminoso rugoso e modificado com borracha ou, até mesmo, para o tipo de pavimento rígido em betão.

No que respeita ao parâmetro relativo ao fenómeno de permeabilidade dos pavimentos drenantes, o coeficiente λ , carece de um estudo aprofundado, de modo a avaliar a evolução deste ao longo dos anos de serviço das vias e a respetiva consequência na determinação do coeficiente de atrito na travagem pelo modelo de interação pneu-pavimento. Assim, este coeficiente poderá depender, por exemplo das condições ambientais das zonas envolventes da estrada em análise, da presença de contaminantes e da ação do tráfego.

O culminar desta investigação na fronteira entra o tema de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica seria alcançado com a aplicação do modelo desenvolvido no próprio sistema de ABS dos veículos (ou no ajuste de outros sistemas ativos de proteção), resultando na diminuição da distância de travagem destes e, consequentemente na probabilidade de acidentes.

Referências bibliográficas

Referências bibliográficas

- AASHTO (1994). *A Policy on Geometric Design of Highways and streets American*. Association of state Highway and transportation official. Washington, D.C., EUA.
- AASHTO (2001). *A Policy on Geometric Design of Highways and streets American*. Association of state Highway and transportation official. Washington, D.C., EUA.
- ACAS (2015), disponível em: <http://cartech.about.com/od/Safety/a/Collision-Avoidance.htm>, data de consulta a 29-01-2015.
- ACC (2015), disponível em <http://www.scania.pt/camioes/principaiscomponentes/chassis/sistemas-de-seguranca/acc/>, data de consulta a 30-01-2015.
- Achútegui, F. (2002). *Características Superciales - Medidas de las Características Superficiales*. XVI Curso Internacional de Carreteras. Madrid (citado em Pinto 2003)
- Al-Qadi, I., Loulizi, A., Flintsch, G., Tech, V. & Blacksborg, V. (2002). *Feasibility of Using Friction Indicators to Improve Winter Maintenance Operations and Mobility*. (Relatório final do contratante preparado para: National Cooperative Highway Research Program e. Transportation Research Board of the National Academies. Universidade de Iowa (EUA).
- Almeida, S. (2013). *Controlador tolerante a falhas para veículos elétrico Multi-Motor* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia do Porto. Universidade do Porto.
- Almeida, C. (2011). *Gestão da Conservação de Pavimentos de Auto-estradas - Estudo do caso Ascendi* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra.
- Aly, A., Zeidan, E., Hamed, A. & Salem F. (2011). An Antilock-Braking Systems (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*, n.º2 (2011), pp. 186-195. DOI: 10.4236/ica.2011.23023.

- Andersen, L., Larsen, J., Fraser, E., Schmidt, B. & Dyre, J. (2014). Rolling Resistance Measurement and Model Development. *Journal of Transportation Engineering*.ASCE. . In Press, Available online. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000673.
- Antunes, L., Marecos, V., Espírito Santos, J., Barros, R. & Lima, H. (2008). Avaliação do coeficiente de atrito em pavimentos rodoviários com o equipamento GripTester. Em: *Avaliação das características de superfície dos pavimentos* Universidade do Minho, Guimarães, Pereira, P (ed.) Universidade do Minho. pp. 59 - 66. ISBN: 978-972-8692-37-7.
- Aps, M. (2006). *Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – International Friction Index para revestimentos asfálticos* (Tese de Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ASCENDI (2015). *Ensaio de GripTester e Mancha de Areia em troços da A25 e A29 – Documento particular*, 4pp.
- Ascenso, S. (2011). *Conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários - avaliação das características superficiais* (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.
- Austroroads (2003). *Guide to the Selection of Road Surfacing*. (2ªed.). Sydney, Australia.
- Azimi, H., Galal, K., Pekau, O. (2011). A modified numerical VBI element for vehicles with constant velocity including road irregularities. *Engineering Structures*, nº33 (2011), pp .2212-2220. DOI:10.1016/j.engstruct.2011.03.012.
- Barros, R. (2008). *Medição do coeficiente de atrito com o “grip-tester”*. Disponível em: http://www.crp.pt/docs/A11S96-pavimentos_44.pdf, data de consulta a 27-11-2014.
- BAS (2014), disponível em: <http://www.mercedesbenz.pt/content/portugal>, data de consulta a 28 – 10 – 2014.
- Benta, A. (2013). *Ensaio de Mancha de Areia e Pêndulo em BB – Universidade de Aveiro*, 2 pp.

- Bernucci, B., Mota, L., Ceratti, J., & Soares, J. (2007). *Pavimentação Asfáltica*. Formação básica para Engenheiros (2ªed). ABEDA- Associação Brasileira das Empresas distribuidoras de Asfaltos, Petrobras – Petróleo Brasileiro, S.A. Rio de Janeiro.
- Bitelli, G., Simone, A., Girardi, F. & Lantieri, C. (2012). Laser Scanning on Road Pavements: A New Approach for Characterizing Surface Texture. *Sensors*, nº12 (2012), pp.9110-9128. DOI:10.3390/s120709110.
- Branco, F., Perreira, P. & Picado-Santos, L. (2011). *Pavimentos Rodoviário*. (4ªed.). Coimbra: Edições Almedina.
- Burckhardt, M. (1993). *Fahrwerktechnik: ratschlupf-regelsysteme*. Wrzburg: Vogel Verlag, Germany (citado em Zhang *et al.*, 2013; Hoàng, 2014; Pinto, 2014; Wang *et al.* 2014; Dousti *et al.*, 2015).
- Brosseaud, Y. (2005) disponível em http://www.lcpl.fr/fr/sources/seminaires/secu_2005/19-7.pdf. (citado em Aps, 2006).
- BV-11 Skiddometer (2015), disponível em: <http://www.airport-technology.com>, data de consulta a 10 - 04 - 2015.
- Castro, R. (2008). *Sistema de controlo de estabilidade para o ucar*. Relatório técnico. Laboratório de Sinais e Sistemas, Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.
- CEPRA, (2000a). *Rodas e Pneus*. Formação Modular Automóvel. (1ªed.) Centro de Formação Profissional da Reparação Automóvel. Lisboa: CEPRA. Disponível em: http://portal.iefp.pt/xeobd/attachfileu.jsp?look_parentBoui=16212898&att_display=n&att_download=y, data de consulta a 29-01-2015.
- CEPRA, (2000b). *Sistema de Segurança Activa*. Formação Modular Automóvel. (1ªed.) Centro de Formação Profissional da Reparação Automóvel. Lisboa: CEPRA. Disponível em: http://portal.iefp.pt/xeobd/attachfileu.jsp?look_parentBoui=18491096&att_display=n&att_download=y, data de consulta a 20-10-2014.

- Choi, S. (2008). Antilock brake system with a continuous wheel slips control to maximize the braking performance and the ride quality. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, vol.16, n.º5 (2003), pp. 996-1003 (citado em Hoàng,2014).
- Comfort, G. (2001). *Wet Runway Friction: Literature and Information Review*. Transportation Development Centre, On behalf of Aerodrome Safety Branch Transport Canada.
- Corey- Lay, J. (1998) *Friction and Surface Texture Characterization of 14 Pavement Test Sections in Greenville, North Carolina*. Transportation Research Record, Washington, D. C., n.º1639 (citado em Aps, 2006).
- Crisman, B. & Roberti, R. (2012). Tire wet-pavement traction management for safer roads. *5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures*. Procedia-Social and Behavioral, nº53 (2012), pp.1055-1068. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.09.955.
- Couchinho, R. (2011). *Medição do coeficiente de atrito da superfície de pavimentos* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia Lisboa.
- Decreto-Lei n.º 72-C/2003 de 14 de Abril, “Método de ensaio dos níveis das emissões sonoras de pneu em estrada – ensaio com o motor desligado”, Diário da República, I Série – A, pp. 2452 (87), 2003.
- Decreto-Regulamentar n.º 3/2005 de 10 de Maio. Diário da República, I Série – B N.º90, pp. 3320, 2005.
- Delanne, Y. (1997). *Uni des chaussées et confort vibratoire des véhicule*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes (citado em Menezes 2008).
- Do, M & Roe, P. (2008). *Report on state-of-the-art of test method*. (in WP2 Harmonisation of skid –resistance methods and choice of reference surfaces) TYROSAFE.
- Dousti, M., Baslamisli, S., Onder, E. & Solmaz, S. (2015). *Design of a multiple-model switching controller for ABS braking dynamics*. Transactions of the Institute of

- Measurement and Control, nº37 (2015), pp. 582 – 595. DOI: 10.1177/0142331214546522.
- Duarte, J. (2011). *Avaliação do coeficiente de atrito em Aeroportos Portugueses: O caso do aeroporto de Lisboa* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- EBD (2015), disponível em: <http://www.toyota.com.au/hilux/features/safety/electronic-brake-force-distribution-ebd>, data de consulta a 29-01-2015.
- EP (2009). Caderno de Encargos tipo Obra: 15.03 – Pavimentação – Métodos Construtivos. Estradas de Portugal, S.A., Almada.
- Erdogan G., Alexander L. & Rajamani R. (2011). Estimation of Tire – Road Friction Coefficient Using a Novel Wireless Piezoelectric Tire Sensor. *Sensores Journal*, vol.1 , n.º2 (2011), pp. 267 -279 DOI:10.1109/JSEN.2010.2053198.
- ESP (2015), disponível em: <http://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/safety-assist/esc/>, data de consulta a 28-01-2015.
- Fernandes, A. & Neves, J. (2008). *Avaliação da relação entre as características superficiais dos pavimentos rodoviários e a segurança de circulação do tráfego*. CESUR. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- Francisco, V. (2009). *A drenagem superficial e o seu impacto funcional e estrutural na vida dos pavimentos rodoviários* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Universidade do Porto.
- Freitas, E., Santos, A. & Picado-Santos, L. (2007). *Estudo do Efeito do tipo de pneu na geração de ruído rodoviário*. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/17202/1/CRP%202008.pdf> data de consulta a 29 – 04 - 2015
- Grip - Tester (2014), disponível em: <http://griptester.us/>, data de consulta a 27 -11 – 2014.

- Gustafsson, F. (1997). Slip – based Tire – Road Friction Estimation. *Automatica*, vol. 33, n.º6 (1997), pp. 1087-1099.
- Guzmán, B. (1995). *Tratamientos y mezclas resistentes al deslizamiento EL Asfalto*. Boletín de la Comisión Permanente del Asfalto, n.º71 (1995), Buenos Aires (citado em Aps, 2006).
- Hahn J., Rajamani, R. & Alexander, L. (2002) GPS-based real-time identification of tire-road friction coefficient. . *IEEE Transaction on Control Systems Technology* , 3ºed , pp. 331-343.
- Hamersma, A. & Els, S. (2014). Improving the braking performance of a vehicle with ABS and a semi active suspension system on a rough road. *Journal of Terramechanics*, nº56 (2014), pp. 91-101. DOI:10.1016/j.jterra.2014.09.004.
- Henry, J. (2000). *Evaluation of pavement friction characteristics* (No. Synthesis of Highway Practice No. 291). Washington, D.C.: National Academy Press, National Cooperative Highway Research Program, National Research Council (U.S.). Transportation Research Board, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Highways Agency (2001). *Design Manual for Roads and Bridges* (vol. 7 - Pavement Design and Maintenance). London, UK: Highways Agency (citado em Wilson, 2006).
- Hoàng, T. (2014). *Switched observers and input – delay compensation for anti – lock brake systems* (Tese de Doutorado). École Doctorale: STITS, Universidade Paris.
- IMTT (2010a). *Ficha técnica: Sistema de segurança Ativa*. Manual do ensino da condução. Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres, IP. Disponível em: http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/EnsinoConducao/ManuaisEnsinoConducao/Documents/Fichas/FT_SistemasSegurancaAtiva.pdf, data de consulta a 20-10-2014.

- IMTT (2010b). *Ficha técnica: Sistema de segurança Passiva*. Manual do ensino da condução. Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres, IP. Disponível em: http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/EnsinoConducao/ManuaisEnsinoConducao/Documents/Fichas/FT_SistemasSegurancaPassiva.pdf, data de consulta a 20-10-2014.
- INIR (2010). *Norma de traçado*. Disposições normativas. Revisão da norma de traçado. Inir - Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP. [Online] 19 de Janeiro de 2011. Disponível em: <http://www.inir.pt/portal/LinkClick.aspx?fileticket=I%2bmqF3AOYtM%3d&tabid=111&mid=482&language=pt-PT>, data de consulta a 25-04-15.
- Isermann, R., Mannale, R. & Schmitt, K. (2012). Collision-avoidance systems PRORETA: Situation analysis and intervention control. *Control Engineering Practice*, nº20 (2012), pp. 1236-1246. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.06.003>
- Jarasuniene, A., Jakubauskas, G. (2007). Improvement of Road Safety using passive and active intelligent vehicle safety systems. *Transport*, vol. XXII, nº4 (2007), pp. 284-289. DOI: 10.1080/16484142.2007.9638143.
- JAE (1994). *Norma de traçado*. Divisão de Estudos e Projectos da Junta Autónoma das Estradas. Lisboa : Edição JAE.
- Jellie, H. (2003). *A study of Factors Affecting Skid Resistance Characteristics*. Unpublished Thesis (DPhil) Universidad de Ulster, Jordanstown, Northern Ireland (citado em Wilson, 2006).
- Jiménez, F., (2014). Manual de Pavimentação, CEPSA.
- Johansen, A., Petersen, I, Kalkkuhl, J. & Ludemann, J.(2003). Gain scheduled wheel slip control in automotive brake systems. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, vol.11, n.º6(2003), pp. 799-811 (citado em Hoàng,2014).
- Kawaguchi H. (2005). *Comparação da análise de conforto de frenagem subjetiva x objetiva de um veículo de passeio* (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- Kleer, A., Thielo, M. & Santos, A. (1997). *A física utilizada na investigação de acidentes de trânsito*. Departamento de Física. Universidade Federal Do Rio Grande do Sul.
- Leu, M. & Henry, J. (1983). Prediction of Skid Resistance as a Function of Speed from Pavement Texture. *Transportation Research Record*, vol. 946 (citado em Wilson, 2006)
- Liu, C., Peng, H. (1996). Road Friction Coefficient Estimation For Vehicle Path Prediction. *Vehicle System Dynamics*, vol.25, pp.413-425 (citado em Wang, *et al.*).
- Linhares, L. (2015). *Dinâmica de pneus*. Trabalho realizado para a unidade curricular de SPSA (docente: Professor José Duarte). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em: http://estudomec.info/files/OT_LuisLinhares_Dinamica_Pneus.pdf, data de consulta a 2-09-2015
- Loprencipe, G. & Cantisani G. (2013). Unified Analysis of Road Pavement Profiles for Evaluation of Surface. *Modern Applied Science*, vol. 7, nº8 (2013), pp. 1-14. DOI:10.5539/mas.v7n8p1.
- Mattos, J. (2009). Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR – 290/RS (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Mattos, J. (2010). *Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendência de desempenho para a rodovia BR - 290/RS*. (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Mattos, J., Ceratti, J. & Núñez, W. (2010). *Análise de aderência pneu-pavimento em diferentes tipos de revestimentos de pavimentos*. Relatório Final. ANTT; Triunfo, Concepsa; S&T.
- Miller, A. (2014). Safe vehicle transport – the roles of collision avoidance and real time data acquisition. In *4th international safer road conference Cheltenham*, Reino Unido. Disponível em: <http://www.saferroads.org.uk/2014papers.asp>, data de consulta a 05-11-2014.

- Menezes, M. (2008). *Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise da segurança do tráfego* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- Merighi, J.; Peres, R. & Silva, G. (2006). *Influência da Natureza da Superfície de contacto na geração de aderência nos pavimentos aeroportuários*. V Jornadas Luso – Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias, Recife – PE, V – 039.
- NCAP (2015), disponível em: <http://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/safety-assist/esc/>, data de consulta a 28 -01 – 2015.
- OCDE (1984). *Caractéristiques de Surface des Revêtements Routiers: Leur Interaction et Leur Optimisation*. Recherche en Matière des Routes et des Transports Routiers. (citado em Pinto, 2003 e Ascenso, 2011).
- Pacejka, H. (2006) *Tyre and vehicle dynamics*. Oxford: Butterworth-Heinemann; pp. 156-172 (citado em Pinto, 2014; Zhang *et al.*, 2014; Dousti *et al.*, 2015).
- Pasillas-Lépine, W., Loría, A., & Gerard, M. (2012). Design and experimental validation of a nonlinear wheel slip control algorithm. *Automatica*, vol. 48, n.º8, pp. 1852-1859 (citado em Hoàng).
- Pêndulo Britânico (2015), disponível em: <http://www.highwaysmaintenance.com/>, data de consulta a 22 - 02 – 2015.
- Pereira, A. (2010) *Análise da aderência Pneu-pavimento em rodovias dos estados de Pernambuco e da Paraíba com elevado índice de Acidentes* (Tese de Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Geotecnia. Universidade Federal de Pernambuco.
- Pereira, C., Soares, J.; Pontes-Filho, I. & Branco, V. (2012). Análise da aderência pneu-pavimento em pontos de ocorrência de acidentes. *Transportes*, vol.20, nº2 (2012), pp. 65-74. DOI:10.4237/transportes.v20i2.525.

- PIARC/AIPCR (1995). International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Skid Resistance and Texture Measurements – PIARC Publication nº01.04 (citado em Pinto, 2003).
- PIARC/AIPCR (2000). *Pavement Surface Characteristics – IVth International Symposium “SURF 2000”* – 22 a 24 May 2000 – Nantes, France (citado em Pinto 2003).
- PIARC/AIPCR (2003). *Evaluation of Investigations into the Applications of the IFI. Routes/Roads*, 2003; nº 318 – II. Paris (citado em Menezes, 2008 e Duarte, 2011).
- Pinto, J. (2014). *Formula Student – Sistema de Tração* (Dissertação de Mestrado) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Universidade do Porto.
- Pinto, J. (2003). *Caracterização superficial de pavimentos rodoviários* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Universidade do Porto.
- Pinto, R. (2008). *Reconstituição de acidentes rodoviários com veículos de duas rodas* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- Pneus (2015), disponível em: http://www.confortauto.pt/Tudo_sobre_pneus_descricao, data de consulta a 28-01-2015.
- Rado, Z. (1994). *Analysis of Texture Profiles* (No. PTI Report 9510). Pennsylvania, EUA: Instituto de Transporte Pennsylvania, State College (citado em Wilson, 2006).
- Rodrigues-Filho, O. (2006). *Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários – Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas* (Dissertação de Mestrado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo.
- Salpico, F. (2009). *O Perigo Grave de Hidroplanagem nas Estradas Portuguesas – Formulação de Cálculo e Propostas para Resolução de Problemas*. Estudo de Segurança Rodoviária, OSEC – Observatório de segurança de Estradas e Cidades. (citado em Soares, 2011).

- Salpico, F. (2010). *Relatório Preliminar de Peritagem às Condições de Segurança Rodoviária da Auto-Estrada A8*. OSEC - Observatório de segurança de Estradas e Cidades. Disponível em: <http://static.publico.pt/docs/local/relatoriopreliminara8osec23012010.pdf>, data de consulta a 03-11-2014.
- Santos, A. (2007). *Estudo da eficácia na redução do ruído de tráfego em pavimentos drenantes* (Dissertação de Mestrado) Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Minho.
- Savaresi, S., Tanelli, M., & Cantoni, C. (2007). Mixed slip-deceleration control in automotive braking systems. *Journal of Dynamic Systems*, Measurement and Control, vol. 129, n.º1, pp. 20-31 (citado em Hoàng, 2014).
- SCRIM (2014), disponível em: <http://www.wdm.co.uk/equipment/3-equipment/3-scrimr-scrimtex>, data de consulta a 27 – 11- 2014.
- Segel, L. (1977). Opening paper (vol. 621). Columbus, *Ohio: Transportation Research Record* (citado em Wilson, 2006).
- Shen, Y., Hermans, E., Bao, Q., Brijs, T., Wets, G. & Wang W. (2014). Inter-national benchmarking of road safety: State of the art. *Transportation Research Part C*. In Press, Available online. DOI:10.1016/j.trc.2014.07.006.
- Shim, T. & Margolis, D. (2010). Model – Based Road Friction Estimation. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol.41. n-º 4 pp. 249 – 276. DOI: 10.1080/00423110412331315150.
- Silva, J. (2008). *Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários*. (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília.
- Silva, L. (2009). *Pavimentos Aeroportuários: Análise de soluções rígidas e de soluções flexíveis*. (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.

- Soares, A. (2011). *Análise da ocorrência de hidroplanagem num caso real* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciência e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.
- Souza, F., Amarante-Júnior F., Sant’Anna, F. & Oliveira, P. (2005). Fresagem fina como medida de melhoramento da segurança da rodovia presidente Dutra no trecho da Serra das Araras, 36ª *Reunião Anual de pavimentação – 36ºRAPv*, Curitiba – 24 a 26 de agosto de 2005.
- Subviragem e sobreviragem (2015), disponível em: <http://www.bfgoodrich.pt/pt/conselhos/Guia-de-conducao/Algumas-definicoes>, data de consultado a 28-01-2015.
- Surface Friction Tester (2015), disponível em: <http://www.airport-technology.com>, data de consulta a 10 -04 – 2015.
- Toresan, W. (2007). *Cálculo de velocidade para veículos equipados com sistemas de freios ABS*. Instituto Geral de Perícias – RS.
- Umeno, T., Ono, E., Asano, K *et al.* (2002). *Estimation of tire-road friction using tire rotational vibration*. Detroit, MI, USA: SAE. (citado em Wang, *et al.*).
- Unsal, C., Kachroo P. (1999). Sliding mode measurement feedback control for antilock braking systems. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, vol.7, n.º2 (1999), pp. 271-281 (citado em Hoàng,2014).
- Veith, A. (1983). *Tires-roads-rainfall-vehicles: The traction connection*. In W. E. Meyer & W. J. D. Walter (Eds.), *Frictional interaction of tire and pavement: a symposium / sponsored by ASTM Committees E-17 on Traveled Surface Characterstics and F-9 on Tires* (vol. Special Technical Publication 793, pp. 3-40). Akron-Fairlawn, Ohio: ASTM (citado em Wilson, 2006).
- Wambold, J., Antle, C., Henry, J., & Rado, Z. (1995). *International PIARC experiment to compare and harmonise texture and skid resistance measurements*. PIARC Publication, França (citado em Wilson, 2006).

- Wang, B., Guan H., Lu, P., & Zhang, A. (2014). Road surface condition identification approach based on road characteristic value. *Journal of Terramechanics*, nº56 (2014), pp. 103-117. DOI:10.1016/j.jterra.2014.09.001.
- Wilson, D. (2006). *An Analysis of the Seasonal and Short-Term Variation of Road Pavement Skid Resistance* (Tese de Doutorado). Universidade de Auckland, Nova Zelândia.
- Zhang, X., Xu Y., Pan, M. & Ren, F (2014). A vehicle ABS adaptive sliding – mode control algorithm based on the vehicle velocity estimation and tyre/road friction coefficient estimations. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 52, n.º 4 pp. 475 – 503 DOI:10.1080/00423114.2013.864775

Anexos

ANEXO A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DA BIBLIOGRAFIA

Tabela A.I. Fonte de cada estudo

Referência	Fonte
Estudo 1 (E1)	Mattos <i>et al.</i> (2010)
Estudo 1 a) (E1a))	Barros (2008)
Estudo 1 b) (E1b))	Antunes <i>et al.</i> (2008)
Estudo 1 c) (E1c))	Mattos (2010)
Estudo 2 (E2) L-diferentes equipamentos a diferentes velocidades z – zona de ensaio	Couchinho (2011)
Estudo 3 (E3)	Silva (2008)
Estudo 4 – 11 (E4 a E11)	Aps (2006)
Estudo UA (E UA) A1- agregado 1 A2 - agregado 2	Benta (2013)
Estudo 13 (E13)	Almeida (2011)
Estudo 14 - 16 (E14; E15 e E16)	Pereira (2010)
Estudo 17 (E17)	Ascenso (2011)
Estudo 18 (E18) T – troços diferentes antes e após fresagem	Souza <i>et al.</i> (2005)
Estudo 19 – 20 (E19 e E20)	Santos (2007)

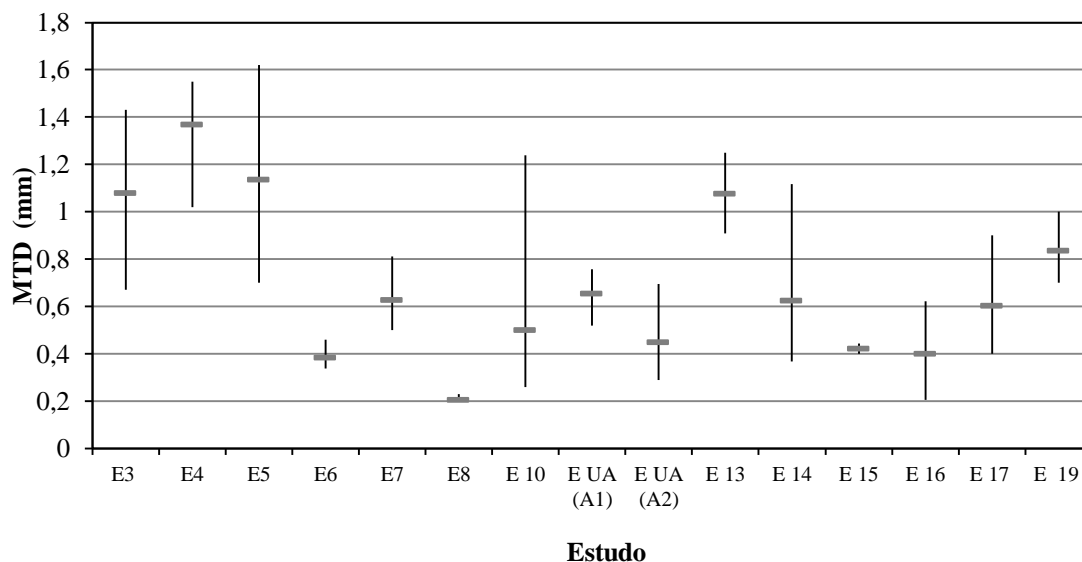


Figura A.I. Valores absolutos de MTD em BB para os respectivos estudos em análise da bibliografia

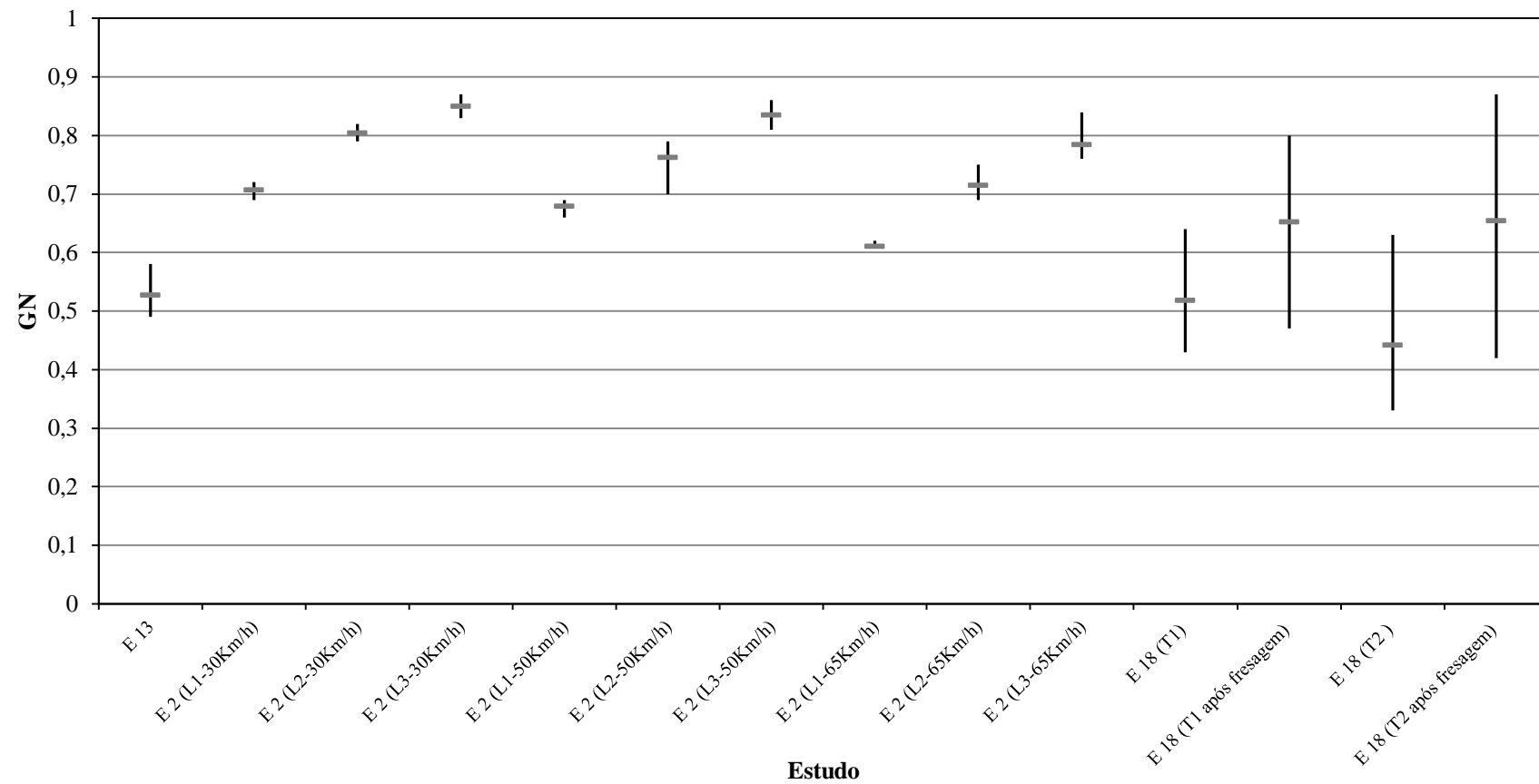


Figura A.II. Valores absolutos de GN em BB para os respectivos estudos em análise da bibliografia

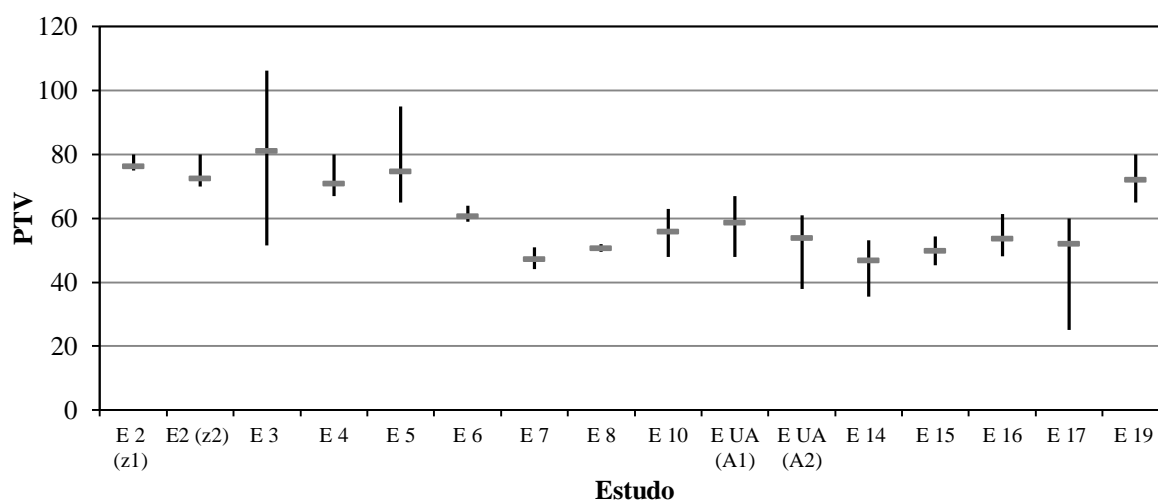


Figura A.III. Valores absolutos de PTV em BB para os respectivos estudos em análise da bibliografia

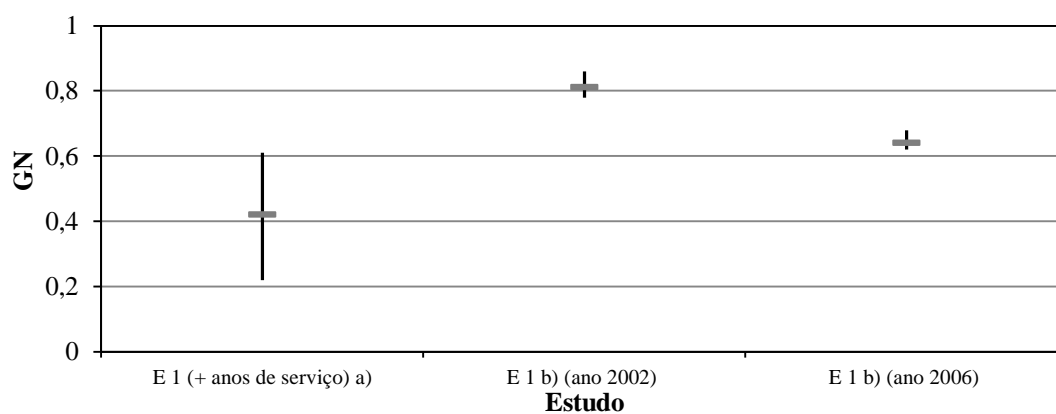


Figura A.IV. Valores absolutos de GN em BBD para os respectivos estudos em análise da bibliografia

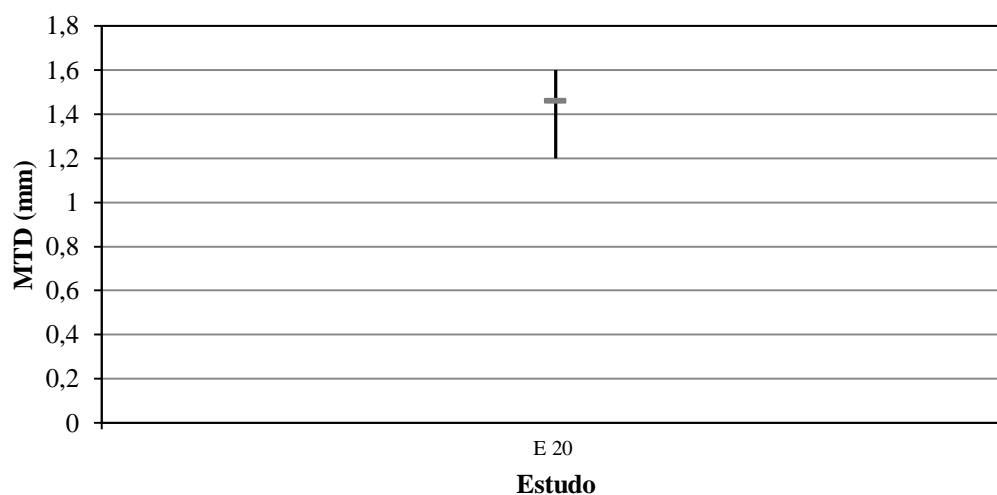


Figura A.V. Valores absolutos de MTD em BBD para o respectivo estudo em análise da bibliografia (Santos, 2007)

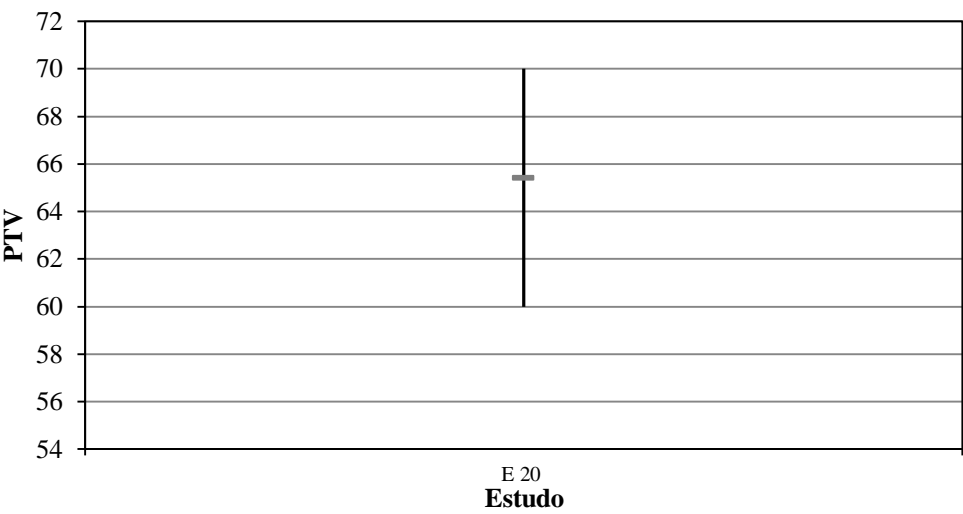


Figura A.VI. Valores absolutos de PTV em BBD para o respectivo estudo em análise da bibliografia (Santos, 2007)

ANEXO B – DISTÂNCIAS DE TRAVAGEM

Tabela B.I. Distâncias de travagem no betão betuminoso denso para todos os sistemas de travagem e velocidades em análise

Distância de travagem (m)												
Sistema de travagem	Sem ABS				Com ABS				Com ABS modificado			
Velocidade (Km/h)	50	90	120	140	50	90	120	140	50	90	120	140
Via												
BB seco (Modelo de Burckhardt)	12,911	41,886	74,482	102,061	8,711	28,211	50,149	68,256	8,412	27,235	48,411	65,889
BB molhado (Modelo de Burckhardt)	19,253	62,436	111,017	151,791	12,584	40,760	72,458	98,622	12,276	39,759	70,678	96,198
A25 – via A molhada	19,545	63,365	112,662	154,027	14,060	45,543	80,961	110,195	13,682	44,310	78,768	107,209
A25 – via A seca	15,271	49,532	88,076	120,565	10,226	33,121	58,877	80,137	9,938	32,184	57,209	77,866
A25 –via B molhada	15,628	50,667	90,084	123,295	11,875	38,465	68,378	93,068	11,564	37,451	66,573	90,610
A25 – via B seca	13,560	43,986	78,216	107,144	9,086	29,427	52,311	71,200	8,830	28,591	50,823	69,173
A25 – via C molhada	15,346	49,750	88,455	121,077	11,897	38,536	68,505	93,241	11,506	37,259	66,232	90,145
A25 – via C seca	13,448	43,623	77,570	106,265	9,139	29,599	52,617	71,615	8,833	28,599	50,835	69,189
A25 - via D molhada	19,029	61,691	109,686	149,976	13,865	44,913	79,841	108,670	13,464	43,605	77,513	105,500
A25 – via D seca	15,071	48,883	86,921	118,993	10,147	32,866	58,425	79,521	9,842	31,871	56,654	77,109

Tabela B.II. Distâncias de travagem no betão betuminoso drenante para todos os sistemas de travagem e velocidades em análise

Distância de travagem (m)												
Sistema de travagem	Sem ABS				Com ABS				Com ABS modificado			
Velocidade (Km/h)	50	90	120	140	50	90	120	140	50	90	120	140
Via												
BB seco (Modelo de Burckhardt)	12,911	41,886	74,482	102,061	8,711	28,211	50,149	68,256	8,412	27,235	48,411	65,889
BB molhado (Modelo de Burckhardt)	19,253	62,436	111,017	151,791	12,584	40,760	72,458	98,622	12,276	39,759	70,678	96,198
A29 – via A molhada (novo)	17,647	57,231	101,763	139,194	11,689	37,863	67,308	91,612	11,407	36,943	65,672	89,384
A29 – via A seca (novo)	17,542	56,890	101,157	138,370	11,571	37,478	66,623	90,680	11,289	36,562	64,994	88,461
A29 – via A molhada (velho)	30,661	99,400	176,731	241,235	19,917	64,521	114,701	156,118	19,421	62,910	111,836	152,218
A29 – via A seca (velho)	17,542	56,890	101,157	138,370	11,571	37,478	66,623	90,680	11,289	36,562	64,994	88,461
A29 – via B molhada (novo)	14,803	48,016	85,380	116,895	9,850	31,901	56,710	77,187	9,610	31,120	55,318	75,292
A29 – via B seca (novo)	14,783	47,952	85,267	116,742	9,769	31,642	56,248	76,558	9,530	30,860	54,857	74,664
A29 – via B molhada (velho)	20,540	66,585	118,387	161,819	14,890	48,233	85,744	116,706	14,565	47,174	83,859	114,139
A29 – via B seca (velho)	14,783	47,952	85,267	116,742	9,769	31,642	56,248	76,558	9,530	30,860	54,857	74,664
A29 – via C molhada (novo)	15,044	48,795	86,766	118,781	10,021	32,456	57,695	78,528	9,774	31,651	56,263	76,578
A29 – via C seca (novo)	15,021	48,723	86,637	118,606	9,938	32,187	57,217	77,877	9,691	31,382	55,786	75,928
A29 – via C molhada (velho)	21,176	68,649	122,055	166,812	15,291	49,533	88,054	119,849	14,950	48,422	86,079	117,160
A29 – via C seca (velho)	15,021	48,723	86,637	118,606	9,938	32,187	57,217	77,877	9,691	31,382	55,786	75,928
A29 – via D molhada (novo)	18,721	60,709	107,946	147,611	12,440	40,293	71,628	97,492	12,129	39,281	69,827	95,040
A29 – via D seca (novo)	18,589	60,283	107,188	146,578	12,304	39,855	70,850	96,433	11,996	38,850	69,062	93,998
A29 – via D molhada (velho)	35,637	115,528	205,405	280,265	22,249	72,075	128,129	174,397	21,654	70,142	124,691	169,716
A29 – via D seca (velho)	18,589	60,283	107,188	146,578	12,304	39,855	70,850	96,433	11,996	38,850	69,062	93,998

Tabela B.III. Distâncias de travagem em BB calculadas com a modelo proposto e com norma do traçado

Velocidade (km/h)	Norma de traçado	Distância (m)					
		Sem ABS		Com ABS		Com ABS modificado	
		Via A molhada	Via C seca	Via A molhada	Via C seca	Via A molhada	Via C seca
50	30,758	19,545	13,448	14,060	9,086	13,682	8,830
90	99,656	63,365	43,623	45,543	29,427	44,310	28,591
120	182,880	112,662	77,570	80,961	52,311	78,768	50,823
140	308,661	154,027	106,265	110,195	71,200	107,209	69,173

Tabela B.IV. Distâncias de travagem em BBD calculadas com o modelo proposto e com norma do traçado

Velocidade (km/h)	Norma de traçado	Distância (m)					
		Sem ABS		Com ABS		Com ABS modificado	
		Via A molhada	Via C seca	Via A molhada	Via C seca	Via A molhada	Via C seca
50	30,758	35,64	14,78	22,25	9,77	21,65	9,53
90	99,656	115,53	47,95	72,07	31,64	70,14	30,86
120	182,880	205,41	85,27	128,13	56,25	124,69	54,86
140	308,661	280,26	116,74	174,40	76,56	169,72	74,66

